



# Identification et caractérisation des perturbations affectant les réseaux électriques HTA.

Mathieu Caujolle

## ► To cite this version:

Mathieu Caujolle. Identification et caractérisation des perturbations affectant les réseaux électriques HTA.. Autre. Supélec, 2011. Français. NNT : 2011SUPL0008 . tel-00650911v2

**HAL Id: tel-00650911**

**<https://theses.hal.science/tel-00650911v2>**

Submitted on 27 Feb 2013

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



N° d'ordre : 2011-08-TH

# THÈSE DE DOCTORAT

**SPECIALITE : PHYSIQUE**

**Ecole Doctorale « Sciences et Technologies de l'Information des  
Télécommunications et des Systèmes »**

*Présentée par :*

**Mathieu CAUJOLLE**

Sujet :

**IDENTIFICATION ET CARACTERISATION DES PERTURBATIONS  
AFFECTANT LES RESEAUX ELECTRIQUES HTA**

Soutenue le 27 septembre 2011 devant les membres du jury :

<b>M. Luc BERTHET</b>	EDF R&D	Expert - Ingénieur Chercheur, Invité
<b>M. Frédéric BOUILLAUD</b>	LGEP	Professeur, Président du Jury
<b>M. Gilles FLEURY</b>	Supélec	Professeur, Encadrant
<b>M. Mack GRADY</b>	Texas University	Professeur, Rapporteur
<b>M. Jérôme IDIER</b>	IRCCyN Nantes	Chercheur CNRS, Examineur
<b>M. Jean MARTINON</b>	ERDF	Chef de Projet Senior, Examineur
<b>M. Jean-Claude MAUN</b>	Université Libre de BRUXELLES	Professeur, Rapporteur
<b>M. Marc PETIT</b>	Supélec	Enseignant Chercheur, Encadrant



*Le succès c'est d'aller d'échec en échec  
sans perdre son enthousiasme.*

Winston CHURCHILL



## Table des matières

<b>TABLE DES MATIERES .....</b>	<b>5</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>11</b>
<b>PARTIE 1 PERTURBATIONS SUR LES RESEAUX DE DISTRIBUTION HTA ET SYSTEMES DE RECONNAISSANCE .....</b>	<b>13</b>
<b>CHAPITRE 1 – CONTEXTE .....</b>	<b>15</b>
<b>CHAPITRE 2 – CARACTERISTIQUES DES PERTURBATIONS.....</b>	<b>17</b>
2.1. RESEAU DE DISTRIBUTION .....	17
2.1.1. <i>Structure du réseau de distribution</i> .....	17
2.1.2. <i>Régimes de neutre</i> .....	18
2.1.3. <i>Systèmes de protection du réseau</i> .....	19
2.2. PERTURBATIONS AFFECTANT LES RESEAUX HTA .....	20
2.3. DEFAUTS.....	22
2.4. ENCLENCHEMENTS DE TRANSFORMATEURS ET DE DEPARTS .....	23
2.5. ENCLENCHEMENTS DE BATTERIES DE CONDENSATEURS .....	26
<b>CHAPITRE 3 – METHODES D'ANALYSE DES PERTURBATIONS .....</b>	<b>28</b>
3.1. ARCHITECTURE DES SYSTEMES DE RECONNAISSANCE .....	28
3.2. ANALYSE DES FORMES D'ONDE.....	29
3.2.1. <i>Grandeurs électrotechniques classiques</i> .....	29
3.2.2. <i>Estimation de la fréquence fondamentale</i> .....	30
3.2.3. <i>Analyse temps-fréquence</i> .....	30
3.2.4. <i>Estimation spectrale paramétrique</i> .....	33
3.3. PROCEDES DE DECOMPOSITION DES FORMES D'ONDE .....	35
3.3.1. <i>Principes et objectifs des procédés de décomposition</i> .....	35
3.3.2. <i>Structure des procédés de segmentation</i> .....	36
3.3.3. <i>Fusion des informations de segmentation</i> .....	37
3.4. CARACTERISATION DES PERTURBATIONS .....	38
3.5. SYSTEMES D'IDENTIFICATION .....	39
<b>CHAPITRE 4 – ARCHITECTURE DU SYSTEME DE RECONNAISSANCE.....</b>	<b>42</b>
<b>PARTIE 2 SEGMENTATION ADAPTATIVE DES FORMES D'ONDE .....</b>	<b>47</b>

---

<b>CHAPITRE 5 – SEGMENTATION DES PERTURBATIONS.....</b>	<b>49</b>
<b>CHAPITRE 6 – SEGMENTATION DES REGIMES DE FONCTIONNEMENT.....</b>	<b>51</b>
6.1. PRINCIPE DE LA METHODE DE SEGMENTATION ADAPTATIVE .....	51
6.2. OBJECTIFS DU PROCEDE DE SEGMENTATION .....	52
6.3. ARCHITECTURE DU PROCEDE DE SEGMENTATION ADAPTATIF .....	55
<b>CHAPITRE 7 – PRE-TRAITEMENT DES FORMES D'ONDE .....</b>	<b>57</b>
7.1. CRITERES DE SELECTION DES INDICES DE SEGMENTATION .....	58
7.2. ESTIMATION DE LA FREQUENCE FONDAMENTALE .....	59
7.2.1. <i>Intérêt de l'estimation de la fréquence fondamentale</i> .....	59
7.2.2. <i>Estimation de la fréquence à partir des passages par zéro</i> .....	60
7.2.3. <i>Gestion des informations de fréquence</i> .....	61
7.3. METHODES DE FILTRAGE DES FORMES D'ONDE .....	62
7.3.1. <i>Filtrage anti-harmoniques (AHF)</i> .....	62
7.3.2. <i>Filtrage de Kalman</i> .....	69
7.4. CALCUL DE L'ENERGIE DU SIGNAL FILTRE .....	75
7.5. ETUDE COMPARATIVE DES INDICES DE SEGMENTATION .....	76
<b>CHAPITRE 8 – DETECTION DES TRANSITOIRES DES PERTURBATIONS .....</b>	<b>82</b>
8.1. CRITERES D'EVALUATION DE LA DETECTION .....	82
8.2. LIMITES DU SEUILLAGE STATIQUE.....	83
8.3. ALGORITHME DE DETECTION ADAPTATIF.....	85
8.3.1. <i>Adaptation des seuils de détection</i> .....	85
8.3.2. <i>Détection des transitoires</i> .....	87
<b>CHAPITRE 9 – POST-TRAITEMENT DE LA DECOMPOSITION .....</b>	<b>89</b>
9.1. COMPENSATION DU RETARD DE SEGMENTATION.....	89
9.1.1. <i>Origine du retard de segmentation</i> .....	89
9.1.2. <i>Intérêt de la compensation du retard de la décomposition</i> .....	89
9.1.3. <i>Méthodes de compensation du retard</i> .....	91
9.2. FUSION DES SEGMENTATIONS .....	96
<b>CHAPITRE 10 – SEGMENTATION « EVENEMENTIELLE » .....</b>	<b>99</b>
10.1. PRINCIPE DE LA SEGMENTATION EVENEMENTIELLE.....	99
10.2. OBJECTIFS DU PROCEDE DE SEGMENTATION .....	100
10.3. ARCHITECTURE DU PROCEDE DE SEGMENTATION EVENEMENTIELLE.....	102
10.4. PRE-TRAITEMENT DES FORMES D'ONDE .....	103
10.4.1. <i>Calcul de la valeur efficace de la tension homopolaire</i> .....	103
10.4.2. <i>Calcul du gradient</i> .....	105

---

## Table des matières

---

10.5.	PROCEDE DE DECOMPOSITION.....	106
10.6.	POST-TRAITEMENT DES SEGMENTATIONS.....	111
<b>CHAPITRE 11 – PERFORMANCES DU PROCEDE DE SEGMENTATION .....</b>		<b>114</b>
11.1.	DESCRIPTION DE LA BASE D’EVALUATION.....	114
11.2.	PERFORMANCES DE LA SEGMENTATION ADAPTATIVE.....	116
11.3.	PERFORMANCES DE LA SEGMENTATION EVENEMENTIELLE.....	119
<b>PARTIE 3 CARACTERISATION DES PERTURBATIONS .....</b>		<b>121</b>
<b>CHAPITRE 12 – CARACTERISATION DES PERTURBATIONS.....</b>		<b>123</b>
12.1.	OBJECTIFS DE LA CARACTERISATION.....	123
12.1.1.	<i>Principe de la caractérisation.....</i>	<i>123</i>
12.1.2.	<i>Cadre d’utilisation des indicateurs .....</i>	<i>124</i>
12.1.3.	<i>Sélection et mise en œuvre des indicateurs.....</i>	<i>124</i>
12.2.	ANALYSE DIFFERENCIEE DES REGIMES DE FONCTIONNEMENT.....	125
<b>CHAPITRE 13 – ANALYSE DES REGIMES PERMANENTS.....</b>		<b>128</b>
13.1.	GRANDEURS ELECTROTECHNIQUES UTILISEES PAR LES INDICATEURS.....	128
13.2.	INDICATEURS DE REGIMES PERMANENTS.....	128
13.3.	REFERENCEMENT DES VARIATIONS .....	130
<b>CHAPITRE 14 – ANALYSE DES REGIMES TRANSITOIRES .....</b>		<b>132</b>
14.1.	FAMILLES D’INDICATEURS UTILISEES .....	132
14.2.	EXPLOITATION DES VARIATIONS LOCALES.....	132
14.2.1.	<i>Mise en œuvre des indicateurs « classiques ».....</i>	<i>133</i>
14.2.2.	<i>Analyse des composantes symétriques.....</i>	<i>135</i>
14.2.3.	<i>Analyse des puissances réactives.....</i>	<i>136</i>
14.2.4.	<i>Analyse des valeurs moyennes .....</i>	<i>137</i>
14.2.5.	<i>Analyse des valeurs efficaces calculées sur une base <math>T0/2</math>.....</i>	<i>138</i>
14.2.6.	<i>Analyse des formes d’onde par filtrage anti-harmoniques .....</i>	<i>140</i>
14.3.	IDENTIFICATION DE MODELES COMPORTEMENTAUX.....	144
14.3.1.	<i>Modèle comportemental exponentiel.....</i>	<i>145</i>
14.3.2.	<i>Modèle comportemental sinusoïdal amorti .....</i>	<i>147</i>
<b>CHAPITRE 15 – SENSIBILITE AUX ERREURS DE SEGMENTATION .....</b>		<b>155</b>
15.1.	IMPACT SUR LA CARACTERISATION DES REGIMES PERMANENTS.....	155
15.2.	IMPACT SUR LA CARACTERISATION DES REGIMES TRANSITOIRES.....	156
15.2.1.	<i>Enclenchements de batteries de compensation.....</i>	<i>157</i>
15.2.2.	<i>Réenclenchements de départs .....</i>	<i>161</i>

---



---

<b>PARTIE 4 SYSTEME DE RECONNAISSANCE .....</b>	<b>163</b>
<b>CHAPITRE 16 – RECONNAISSANCE DES PERTURBATIONS .....</b>	<b>165</b>
<b>CHAPITRE 17 – ARCHITECTURE DU SYSTEME DE RECONNAISSANCE.....</b>	<b>167</b>
17.1. UNE STRUCTURE EN DEUX PARTIES.....	167
17.2. CLASSES D’EVENEMENTS RECHERCHES .....	168
17.3. RECONNAISSANCE DES EVENEMENTS PERMANENTS .....	170
17.4. RECONNAISSANCE DES EVENEMENTS TRANSITOIRES .....	171
17.5. SYSTEMES DE DECISION .....	175
17.5.1. <i>Système de décision expert</i> .....	175
17.5.2. <i>Système de décision à apprentissage supervisé</i> .....	178
<b>CHAPITRE 18 – CONSTITUTION DES BASES DE CONNAISSANCES .....</b>	<b>181</b>
18.1. OBJECTIFS .....	181
18.2. CONFIGURATIONS DES RESEAUX D’ETUDE .....	182
18.3. DEMARCHE DES SIMULATIONS PARAMETRIQUES .....	184
18.4. OPTIMISATION DE LA STRATEGIE DE SIMULATIONS.....	186
18.4.1. <i>Contexte d’utilisation</i> .....	186
18.4.2. <i>Commande des simulations</i> .....	188
<b>CHAPITRE 19 – MISE AU POINT DES SYSTEMES DE DECISION .....</b>	<b>191</b>
19.1. CALIBRAGE DES CRITERES DES SYSTEMES EXPERTS.....	191
19.1.1. <i>Objectifs de l’optimisation des systèmes expert</i> .....	192
19.1.2. <i>Définition des critères de reconnaissance</i> .....	195
19.1.3. <i>Définition de la structure de reconnaissance</i> .....	197
19.1.4. <i>Impact des cas d’utilisation</i> .....	199
19.1.5. <i>Evaluation et analyse des performances</i> .....	200
19.2. RECHERCHE DES CLASSIFIEURS SVM OPTIMAUX.....	202
19.2.1. <i>Traitement de la base de données</i> .....	202
19.2.2. <i>Optimisation des performances du classifieur SVM</i> .....	203
19.2.3. <i>Impact des cas d’utilisation</i> .....	206
19.2.4. <i>Evaluation et analyse des performances</i> .....	207
<b>CHAPITRE 20 – PERFORMANCES DU SYSTEME DE RECONNAISSANCE .....</b>	<b>210</b>
20.1. BASE DE DONNEES D’ENREGISTREMENTS REELS .....	210
20.2. ARCHITECTURE REPOSANT SUR LES SYSTEMES EXPERTS .....	212
20.2.1. <i>Evaluation des performances du système expert</i> .....	212
20.2.2. <i>Analyse des performances</i> .....	213
20.3. ARCHITECTURE REPOSANT SUR LES CLASSIFIEURS SVM .....	214

---

## Table des matières

---

20.3.1.	<i>Evaluation des performances des classifieurs SVM</i> .....	214
20.3.2.	<i>Analyse des performances</i> .....	215
20.4.	COMPARAISON DES DEUX SYSTEMES DE CLASSIFICATION.....	217
<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....		<b>221</b>
<b>ANNEXES</b> .....		<b>227</b>
<b>ANNEXE A – IMPACT DES FREQUENCES FONDAMENTALE ET D'ECHANTILLONNAGE</b> .....		<b>229</b>
A.1.	IMPACT SUR LE COMPORTEMENT DE LA VALEUR EFFICACE .....	229
A.2.	IMPACT SUR LE FILTRAGE ANTI-HARMONIQUES .....	230
<b>ANNEXE B – DESCRIPTION DES RESEAUX-TYPES</b> .....		<b>231</b>
B.1.	POINTS DE MESURE CONSIDERES .....	231
B.2.	CONFIGURATIONS DES PERTURBATIONS SIMULEES .....	232
B.3.	ARCHITECTURE DES RESEAUX-TYPES .....	232
B.3.1.	<i>Structure des réseaux</i> .....	232
B.3.2.	<i>Structure des départs</i> .....	233
<b>ANNEXE C – COMMANDE DES SIMULATIONS PARAMETRIQUES</b> .....		<b>235</b>
C.1.	INTERPOLATION SPATIALE PAR KRIGEAGE .....	235
C.1.1.	<i>Principe de l'interpolation par krigeage</i> .....	235
C.1.2.	<i>Structures de dépendance spatiale</i> .....	236
C.1.3.	<i>Algorithme d'interpolation par krigeage</i> .....	237
C.1.4.	<i>Application à l'observation des indicateurs</i> .....	237
C.2.	METHODE D'OPTIMISATION « EXPECTED IMPROVEMENT » .....	239
C.2.1.	<i>Présentation de la méthode EI</i> .....	239
C.2.2.	<i>Application à la commande des simulations paramétriques</i> .....	240
<b>ANNEXE D – CLASSIFIEURS SVM</b> .....		<b>242</b>
D.1.	DETERMINATION DE L'HYPERPLAN DE SEPARATION OPTIMAL .....	242
D.2.	EXTENSION AUX PROBLEMES LINEAIREMENT NON SEPARABLES .....	243
D.3.	GENERALISATION DANS LES ESPACES DE GRANDE DIMENSION .....	244
D.4.	SVM ET PROBLEMES DE DISCRIMINATION MULTI-CLASSES .....	245
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....		<b>247</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....		<b>253</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....		<b>258</b>

---



# Introduction générale

La mesure et l'analyse de la Qualité de l'Électricité fournie aux clients industriels et particuliers est un enjeu majeur pour les fournisseurs et commercialisateurs d'électricité. Elles reflètent une demande forte de la part d'un grand nombre de clients. Pour évaluer la Qualité d'Électricité, poser des diagnostics et proposer des solutions, des outils de traitements automatiques et intelligents sont nécessaires. Ils cherchent à détecter, identifier et localiser les événements responsables de creux et de variations de tension (défauts, enclenchements de départs, raccordement de charges...).

Cette thèse a été lancée afin de proposer de nouvelles méthodologies d'analyse et de reconnaissance des perturbations observées sur les réseaux de distribution HTA. Elle cherche à tirer partie des contextes technique (augmentation des puissances de calcul, réduction des coûts, amélioration des performances des appareils de qualimétrie...) et scientifique (développement des méthodes du traitement du signal et d'analyse de bases de données) favorables pour proposer un système d'identification performant capable d'identifier, automatiquement et en temps-réel, les événements observés sur le réseau.

On présente en Partie 1 les caractéristiques des principales sources de perturbations affectant les réseaux HTA. Un état de l'art des méthodes actuellement utilisées pour la segmentation, la caractérisation et la reconnaissance des perturbations y est effectué. Plusieurs insuffisances et besoins y ont été identifiés. On citera notamment la non-prise en compte de phénomènes, tels que les variations de régimes harmoniques ou les erreurs de segmentation, lors des phases de décomposition et de caractérisation des perturbations. Ces considérations ont conduit à définir une architecture du système de reconnaissance à deux niveaux.

En Partie 2, on se focalise sur la décomposition des formes d'onde des perturbations. Le système proposé dans ce manuscrit réalise la séparation des régimes de fonctionnement transitoires et permanents des perturbations à l'aide de deux méthodes distinctes qui analysent les formes d'onde des tensions et des courants mesurées.

Ces méthodes ont été développées afin de répondre aux problématiques de fiabilité et de précision inhérentes à la décomposition des phases des perturbations. Des traitements adaptatifs ont été mis au point afin de désensibiliser le procédé de segmentation aux perturbations harmoniques et d'améliorer ses performances en présence de transitoires proches. Des méthodes de compensation du retard ont également été élaborées afin de limiter les incertitudes des décompositions déterminées par les deux méthodes.

La Partie 3 est consacrée à l'analyse différenciée des régimes de fonctionnement permanents et transitoires des perturbations. Cette analyse repose sur plusieurs indicateurs, adaptés aux dynamiques des perturbations analysées, qui ont été développés pour synthétiser le comportement des formes d'onde des perturbations au cours des régimes transitoires et permanents. Différents phénomènes ont été pris en compte lors de la sélection et de la mise au point de ces indicateurs. Leur robustesse vis-à-vis des erreurs de mesure et des perturbations harmoniques permanentes est étudiée et leur sensibilité aux erreurs de segmentation est considérée.

En Partie 4, deux méthodologies de reconnaissance ont été mises en concurrence : des systèmes de décision expert et des systèmes à apprentissage supervisé basés sur des classifieurs SVM. Afin d'exploiter les informations fournies par l'analyse différenciée menée lors de la phase de caractérisation, un système de décision est défini pour chaque type de régime de fonctionnement.

On y présente également la méthodologie employée pour construire la large base d'évènements simulés utilisée pour effectuer l'apprentissage de ces deux systèmes. Sa constitution a nécessité l'utilisation d'une stratégie de commande adaptée qui a permis de maintenir le nombre de simulations effectuées dans des proportions raisonnables. A cet effet, des méthodes d'interpolation par krigeage et d'optimisation par analyse du critère d'amélioration estimée (critère EI) ont été utilisées.

On définit également les méthodes qui ont été employées pour calibrer les différents systèmes de reconnaissance à partir de la large base d'évènements simulés. Son analyse a permis de définir la structure des systèmes de décision experts. Pour les classifieurs SVM, cette base a été utilisée afin d'évaluer la capacité de généralisation de leurs différentes variantes par validation-croisée. Les performances de ces deux systèmes sont finalement vérifiées à partir d'un important panel de perturbations réelles.

## Partie 1

# Perturbations sur les réseaux de distribution HTA et systèmes de reconnaissance

### Sommaire :

<b>CHAPITRE 1 – CONTEXTE .....</b>	<b>15</b>
<b>CHAPITRE 2 – CARACTERISTIQUES DES PERTURBATIONS.....</b>	<b>17</b>
2.1. RESEAU DE DISTRIBUTION .....	17
2.1.1. <i>Structure du réseau de distribution.....</i>	<i>17</i>
2.1.2. <i>Régimes de neutre.....</i>	<i>18</i>
2.1.3. <i>Systèmes de protection du réseau.....</i>	<i>19</i>
2.2. PERTURBATIONS AFFECTANT LES RESEAUX HTA .....	20
2.3. DEFAUTS.....	22
2.4. ENCLENCHEMENTS DE TRANSFORMATEURS ET DE DEPARTS .....	23
2.5. ENCLENCHEMENTS DE BATTERIES DE CONDENSATEURS .....	26
<b>CHAPITRE 3 – METHODES D'ANALYSE DES PERTURBATIONS .....</b>	<b>28</b>
3.1. ARCHITECTURE DES SYSTEMES DE RECONNAISSANCE .....	28
3.2. ANALYSE DES FORMES D'ONDE.....	29
3.2.1. <i>Grandeurs électrotechniques classiques.....</i>	<i>29</i>
3.2.2. <i>Estimation de la fréquence fondamentale .....</i>	<i>30</i>
3.2.3. <i>Analyse temps-fréquence .....</i>	<i>30</i>
3.2.4. <i>Estimation spectrale paramétrique .....</i>	<i>33</i>
3.3. PROCEDES DE DECOMPOSITION DES FORMES D'ONDE .....	35
3.3.1. <i>Principes et objectifs des procédés de décomposition.....</i>	<i>35</i>
3.3.2. <i>Structure des procédés de segmentation.....</i>	<i>36</i>
3.3.3. <i>Fusion des informations de segmentation.....</i>	<i>37</i>
3.4. CARACTERISATION DES PERTURBATIONS .....	38
3.5. SYSTEMES D'IDENTIFICATION .....	39
<b>CHAPITRE 4 – ARCHITECTURE DU SYSTEME DE RECONNAISSANCE.....</b>	<b>42</b>



## Chapitre 1 – Contexte

Au cours des dernières décennies, les moyens évaluant la Qualité de l'Électricité sur les réseaux ont fortement progressé. Les avancées techniques et informatiques ont permis une importante augmentation de la capacité de traitement ainsi qu'une forte réduction du coût des appareils de qualimétrie et de la micro-informatique.

Parallèlement, les méthodes de traitement du signal et les techniques d'intelligence artificielle ont connu un véritable essor avec le développement de techniques comme les décompositions en ondelettes ou les méthodes à apprentissage supervisé.

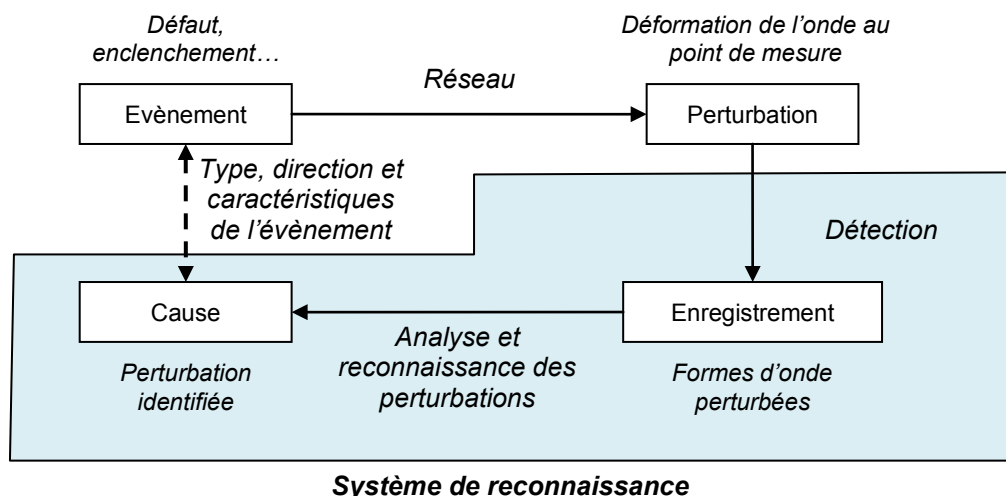
Ce contexte technique favorable a incité au développement de méthodes de traitement automatique des données mesurées sur les réseaux électriques. La grande quantité de données résultant de cette observation rend difficile leur analyse par des moyens uniquement humains et fait de cette automatisation un enjeu essentiel.

De plus, grâce aux performances croissantes des appareils de qualimétrie, les formes d'onde des perturbations sont mesurées avec une précision et une résolution toujours plus importantes. Ces mesures de meilleure qualité donnent accès à de nouvelles informations sur le type, l'origine et les caractéristiques des perturbations. Pour en tirer profit, des outils de traitement et d'analyse adaptés doivent être développés et utilisés.

Dans le domaine de la Qualité de l'Électricité, divers traitements automatisés sont couramment appliqués aux formes d'onde. En fonction de l'application envisagée, leur complexité est variée et leurs objectifs différents. Certains systèmes déterminent des indicateurs fournissant un diagnostic global sur la qualité de la fourniture assurée par le réseau. On citera par exemple les valeurs moyennes des tensions efficaces et les taux moyens d'harmoniques. Toutes ces grandeurs sont calculées sur différents intervalles d'analyse (10 min, 3 s, 1 période...) et à différentes fréquences de rafraîchissement [IEC430]. D'autres systèmes recherchent des informations plus spécifiques dans les formes d'onde : estimation d'état du réseau, analyse des perturbations transitoires et permanentes...

Cette dernière catégorie de systèmes d'analyse a de nombreuses applications dans le diagnostic des réseaux de distribution. Ils s'inscrivent tous dans une même problématique de reconnaissance (Figure 1-1). À partir des formes d'onde des perturbations, ils les détectent, les identifient, déterminent leur direction et éventuellement leur localisation en terme de distance électrique. L'obtention de ce dernier type d'informations suppose en plus une connaissance topologique poussée du réseau. Une fois l'origine de la perturbation identifiée, ses caractéristiques sont déterminées. Elles doivent se rapprocher au mieux de celles de l'évènement responsable.





**Figure 1-1 – Problématique de reconnaissance des perturbations**

Plusieurs types de perturbations sont couramment recherchés par ces systèmes. Elles sont autant dues au fonctionnement anormal du réseau (défauts, rupture de neutre, précurseurs de défaillance...) qu'à son fonctionnement normal (enclenchements de départs, enclenchements de batteries de condensateurs, démarrages de moteurs...).

Les traitements identifiant les perturbations électrotechniques poursuivent plusieurs objectifs. Ils renseignent non seulement sur la qualité de la fourniture d'électricité, mais fournissent également un diagnostic d'un réseau ou d'une installation en identifiant le type et l'origine des perturbations. Ils peuvent être utilisés par le distributeur pour localiser les éventuels points faibles du réseau, pour détecter et analyser les précurseurs de défaillance de certains de ses organes... Pour les clients industriels, la connaissance de l'origine des perturbations permettrait la vérification du respect des contrats qualité.

Les informations recueillies à la suite d'une telle reconnaissance peuvent également être exploitées dans le cadre d'une prise de décision sur le renouvellement du réseau ou la réalisation d'actions préventives. En identifiant les perturbations et en tenant compte de facteurs tels que leurs fréquences de répétition, leurs origines et leurs caractéristiques, l'impact des perturbations sur la durée de vie du matériel connecté au réseau peut être estimé.

Le système de reconnaissance présenté dans ce manuscrit s'inscrit dans la problématique de reconnaissance automatique des perturbations électrotechniques observées sur les réseaux de distribution HTA. Leur origine, type et caractéristiques sont recherchés.

## Chapitre 2 – Caractéristiques des perturbations

Les réseaux de distribution sont touchés par différents types de perturbations. Ces perturbations peuvent les affecter de manière permanente (harmoniques, papillotement...) ou seulement ponctuelle à la suite d'évènements. Cette seconde catégorie de perturbations est liée soit au fonctionnement du réseau en présence de défauts, soit à son fonctionnement normal. Parmi les évènements les plus courants figurent les courts-circuits, les enclenchements de départs, les connexions de batteries de condensateurs, les connexions de charges ou de productions décentralisées, les démarrages de moteurs... Dans ce manuscrit, on se concentrera plus particulièrement sur la segmentation, la caractérisation et l'identification des trois premiers types d'évènements en raison de leur fréquence d'apparition sur les réseaux HTA.

### 2.1. Réseau de distribution

#### 2.1.1. Structure du réseau de distribution

Contrairement aux réseaux de transport, les réseaux de distribution à moyenne tension sont très fortement arborescents (Figure 2-1). Leur niveau de tension s'échelonne entre 5 et 20 kV, ce dernier étant prédominant en France. Les réseaux de distribution alimentent des postes HTA/BT de puissance variable. Ils assurent la connexion de clients BT, de clients HTA et d'installations de production décentralisée sur le réseau HTA. Afin d'adapter les niveaux de tension du réseau (passage 15↔20 kV par exemple), des auto-transformateurs sont insérés dans le réseau de distribution.

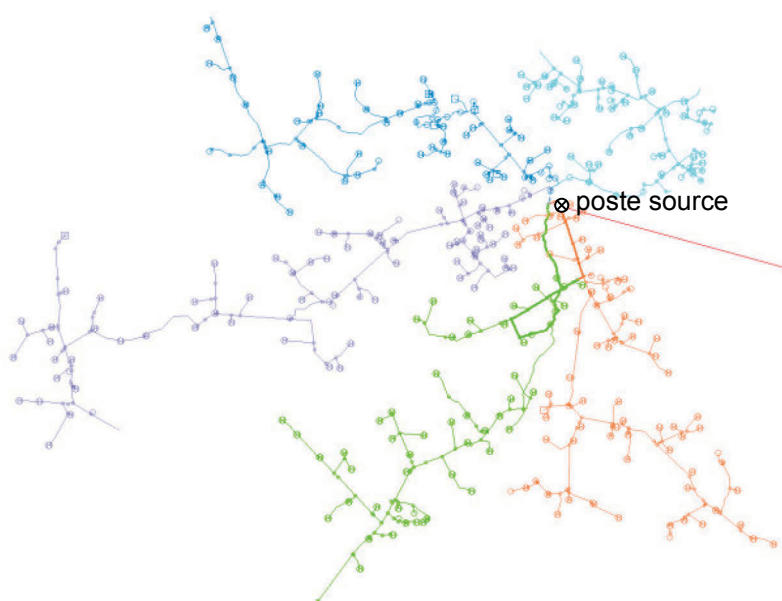


Figure 2-1 – Architecture d'un réseau de distribution HTA rural

Les réseaux de distribution présentent des proportions souterraine et aérienne variables en fonction de leur environnement. Les réseaux ruraux ont ainsi une composante aérienne plus marquée tandis que les réseaux urbains sont presque totalement souterrains. Ces différences de topologie influencent également le choix de la mise à la terre du réseau, les réglages des protections du réseau...

### 2.1.2. Régimes de neutre

Le régime de mise à la terre du neutre HTA ou « régime de neutre » conditionne les conditions d'exploitation du réseau. Il impose, entre autres, l'utilisation de systèmes de protection différents en présence des défauts monophasés. Les caractéristiques de ces défauts diffèrent fortement selon le type de mise à la terre. En France, deux régimes de neutre sont employés sur les réseaux de distribution HTA, les régimes de neutre impédant et compensé [EDF89].

Sur un réseau impédant, le point neutre du réseau est relié à la terre par une impédance de limitation. Elle limite l'intensité des courants apparaissant en présence de défauts monophasés en aval du jeu de barres. Celle-ci est, soit une résistance de limitation (RPN : résistance de point de neutre), soit une bobine de limitation (BPN : bobine de point de neutre).

En régime compensé, le neutre est relié à la terre par une impédance de compensation également appelée bobine de Petersen. Cette impédance est constituée d'une composante résistive et d'une composante inductive. Sa partie inductive est déterminée de manière à compenser la capacité homopolaire du réseau de distribution en aval du jeu de barres. Ce régime de neutre favorise l'auto-extinction des défauts monophasés mais complexifie le schéma d'exploitation [EDF94a, BER98]. Il requiert l'adaptation de la réactance de la bobine à chaque changement de configuration du réseau et nécessite l'emploi de méthodes plus raffinées pour la détection et la localisation des défauts. Pour des raisons de sensibilité des protections, cette impédance est réglée de sorte que le courant de défaut phase-terre soit limité à 40 A et que le courant actif soit supérieur à 20 A en présence de défauts francs [BER95].

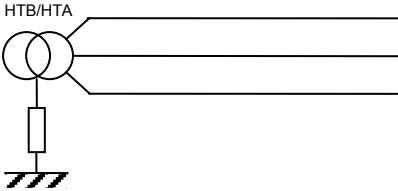
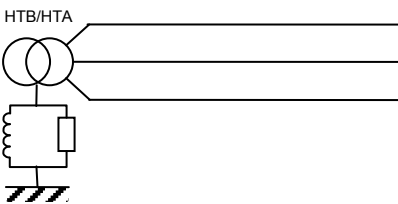
<p><b>Neutre impédant</b></p>		<p>Belgique France Grande-Bretagne Espagne...</p>
<p><b>Neutre compensé (Bobine de Petersen)</b></p>		<p>Allemagne France Grande-Bretagne Suède...</p>

Figure 2-2 – Régimes de mise à la terre du neutre pour un réseau impédant et compensé

### 2.1.3. Systèmes de protection du réseau

Les courts-circuits sont la principale source de creux de tension sur les réseaux de distribution HTA [EDF94a]. Afin d'éliminer les courts-circuits non-permanents, différents automatismes sont utilisés. Leur actionnement dépend de considérations comme la classe du court-circuit (§2.3) ou le régime de neutre du réseau (§2.1.2) [EDF94b, ALL97].

#### 2.1.3.1. Disjoncteur shunt

Le disjoncteur shunt est un système de protection installé uniquement dans les postes sources des réseaux de distribution HTA à neutre impédant. Sa structure est telle que chaque pôle, placé entre une phase et la terre, est commandable séparément. Il est actionné lorsqu'un défaut monophasé persiste au-delà d'une durée comprise entre 60 et 100 ms. Dans ce cas, il shunte la phase en défaut en la mettant directement à la terre pendant une durée variable de 150 à 300 ms. Le court-circuit franc en résultant abaisse la tension de la ligne ( $V_{phase\ en\ défaut} \sim 0$ ) et crée des conditions favorables à l'extinction du défaut.

Sur un réseau à neutre compensé ou en présence de défauts polyphasés, le disjoncteur shunt n'est pas utilisé car il ne favoriserait pas leur élimination, voire contribuerait à les aggraver.

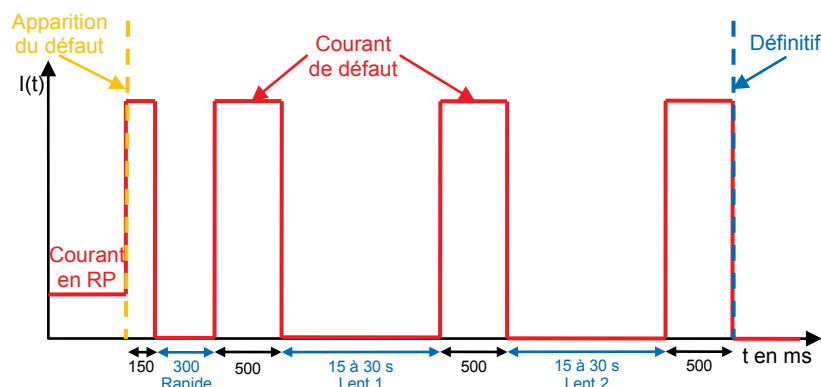
#### 2.1.3.2. Cycles rapide, lent et définitif

Les cycles rapides et lents correspondent à l'ouverture automatique du disjoncteur alimentant le départ sur lequel le défaut est détecté, suivie de son réenclenchement automatique temporisé. Pendant la durée du cycle (typiquement de 200 à 400 ms pour le cycle rapide et de 15 à 30 s pour le cycle lent), le départ en défaut reste isolé du jeu de barres du poste source. La temporisation du défaut avant le début de ces cycles dépend du type de la perturbation et du régime de neutre du réseau. En présence d'un défaut polyphasé, un cycle rapide intervient s'il persiste pendant plus de 100 ms. Un cycle lent est ensuite actionné si le défaut persiste entre 300 et 700 ms après la fin du précédent cycle de réenclenchement. Les protections sont réglées de manière similaire pour les défauts monophasés sur les réseaux à neutre impédant, mais interviennent après l'échec de l'élimination du défaut par le disjoncteur shunt. Pour les défauts monophasés affectant les réseaux compensés, la temporisation de la protection est plus longue. Elle varie entre 600 ms et 1 s afin de laisser le temps au caractère auto-extincteur du réseau compensé d'éliminer naturellement le défaut.

Le déclenchement définitif intervient à la fin du dernier cycle de réenclenchement configuré au poste source en cas de persistance du défaut. Il ouvre définitivement le disjoncteur alimentant le départ en défaut. La remise en service du départ nécessite alors l'intervention d'un opérateur.

Le mode de fonctionnement des protections, décrit aux paragraphes précédents, témoigne des configurations les plus couramment rencontrées sur les réseaux de distribution. Cependant, en

fonction des particularités locales du réseau (topologie, type de clients...), ce schéma de protection est couramment adapté. L'utilisation du disjoncteur shunt et de cycles rapides n'est pas obligatoire et, parfois, seul un cycle lent est réalisé (au lieu de deux typiquement). Par exemple, sur les départs purement souterrains, de tels cycles de réenclenchement n'existent pas : la détection d'un défaut en aval du jeu de barres entraîne le déclenchement définitif du départ mis en cause. Une intervention humaine est alors nécessaire pour sa remise en service.



**Figure 2-3 – Cycle de fonctionnement typique des protections suite à l'apparition d'un défaut polyphasé sur un départ en aval du jeu de barres sur un réseau impédant**

## 2.2. Perturbations affectant les réseaux HTA

De nombreuses sources de perturbations affectent les réseaux de distribution HTA. De caractéristiques variées, elles impactent différemment la Qualité de l'Électricité. Elles sont à l'origine de variations d'amplitude sur les tensions et les courants, de déséquilibre, de déformations des formes d'onde...

Ces perturbations sont classifiées de diverses manières [BOL99, HYD01]. Nous choisissons de distinguer deux classes distinctes dépendant essentiellement de la durée du phénomène observé : les perturbations permanentes qui sont présentes dans les formes d'onde de manière continue et les perturbations transitoires qui les affectent plus ponctuellement (Figure 2-4). La frontière séparant ces deux catégories n'est pas imperméable puisque la majorité des perturbations considérées comme « transitoires » impacte également les perturbations dites « permanentes ». Par exemple, la connexion d'une batterie de compensation entraîne, en plus de sa perturbation transitoire oscillante, une variation du régime harmonique due à la modification de l'impédance du réseau.

### Évènements – Perturbations transitoires

De nombreuses perturbations font suite à des évènements sur les réseaux de distribution. Elles sont dues à des changements de schémas d'exploitation ou de régimes de fonctionnement du réseau. Leur importance dépend également de la localisation de l'appareil de mesure par rapport à celle de l'élément perturbateur. Ces perturbations ont de multiples origines (Figure 2-4).

Les courts-circuits et les défauts d'isolement sont la principale source de perturbations de type « creux de tension ». Ils peuvent affecter l'ensemble du réseau de distribution et perdurer jusqu'au fonctionnement des protections du poste source ou de l'installation responsable. Ils sont désignés par le terme générique de « défauts ».

De nombreuses perturbations transitoires sont également liées au fonctionnement normal du réseau. Une partie est due aux systèmes de protection du réseau [BOL99]. Suite à la présence d'un défaut, ils entreprennent différents types d'actions pour l'éliminer. Ces actions impactent la forme d'onde car elles modifient le point de fonctionnement du réseau. Une autre catégorie de perturbations transitoires survient lors du rétablissement du réseau, c'est-à-dire lors du réenclenchement du départ en défaut. Les connexions de batteries de condensateurs de compensation sont également génératrices de perturbations. Contrôlant la consommation de réactif par le réseau, ces éléments sont fréquemment enclenchés et déclenchés par les systèmes de commande varmétrique [NAT05].

D'autres catégories d'évènements perturbent aussi les formes d'onde des tensions et des courants : les démarrages de moteurs (principalement en BT), les connexions de production décentralisée ou encore l'émission de signaux tarifaires (TCFM - Télécommande Centralisée à Fréquence Musicale). Elles impactent de manière significative les caractéristiques des formes d'onde [BOL95, FAR07].

### **Perturbations permanentes**

Les perturbations dites « permanentes » se distinguent des perturbations précitées car elles sont toujours présentes sur le réseau de distribution. Les harmoniques, les interharmoniques, le déséquilibre et le papillotement tout comme le bruit affectant les formes d'onde mesurées appartiennent à cette famille de perturbations. Ces perturbations ne sont pas analysées par le système de reconnaissance développé.

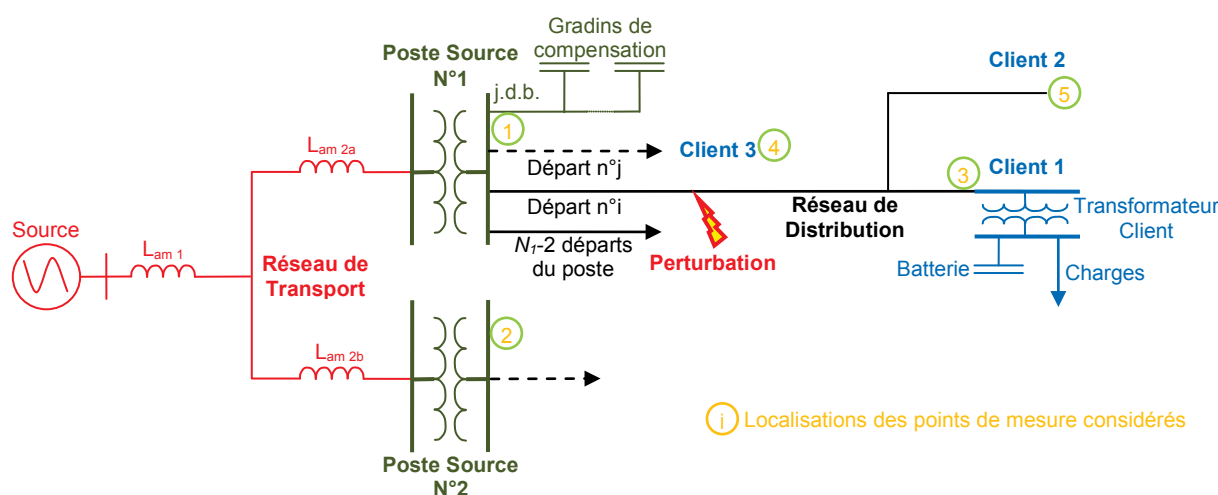
<b><i>Perturbations permanentes</i></b>	<b><i>Evènements</i></b>
<b><i>Harmoniques et interharmoniques</i></b>	<b><i>Creux et coupures :</i></b> <ul style="list-style-type: none"><li>✓ Défauts monophasés, biphasés terre et isolés, triphasés, multiples et évolutifs</li></ul>
<b><i>Papillotement (Flicker)</i></b>	<b><i>Liés au fonctionnement du réseau :</i></b> <ul style="list-style-type: none"><li>✓ Enclenchements de départs,</li><li>✓ Connexion de batteries de compensation,</li><li>✓ Connexion / déconnexion de productions décentralisées,</li><li>✓ Démarrage de moteurs,</li><li>✓ Raccordements de charges...</li></ul>
<b><i>Déséquilibre</i></b>	
<b><i>Bruits propres au réseau (bruit thermique...) et de mesure (chaîne d'acquisition)</i></b>	

**Figure 2-4 – Classification des perturbations apparaissant sur les réseaux de distribution**

Dans ce manuscrit, on se concentre principalement sur les trois principales sources de perturbations transitoires affectant le réseau HTA, à savoir les défauts, les enclenchements de départs et les connexions de batteries de compensation. Les caractéristiques de ces perturbations sont présentées dans les paragraphes suivants. Elles dépendent de différents paramètres propres à la perturbation (l'instant d'apparition, la résistance du défaut...) et au réseau (le flux rémanent, le capacitif du réseau

aval...). Elles dépendent également de l'emplacement à partir duquel la perturbation est observée, c'est-à-dire de la position relative de l'origine de la perturbation par rapport à la position de son point d'observation. Afin de tenir compte de ces paramètres, différentes configurations du réseau sont considérées. Elles mettent en jeu des points de mesure occupant différentes positions sur le réseau, ainsi que différentes origines pour les perturbations considérées.

La Figure 2-5 présente de manière schématique la structure d'un réseau de distribution HTA. Le réseau amont du poste source détaillé (Poste N°1) est constitué par le transformateur du poste et le réseau de transport. Son réseau aval comporte plusieurs départs HTA ainsi que plusieurs gradins de compensation. Chaque arborescence du départ alimente plusieurs postes de livraison clients. Les points de mesure, à partir desquels les perturbations affectant le réseau HTA sont observées, sont reportés sur cette figure.



**Figure 2-5 – Représentation schématique des points de mesure considérés sur le réseau de distribution HTA pour l'analyse des perturbations**

### 2.3. Défauts

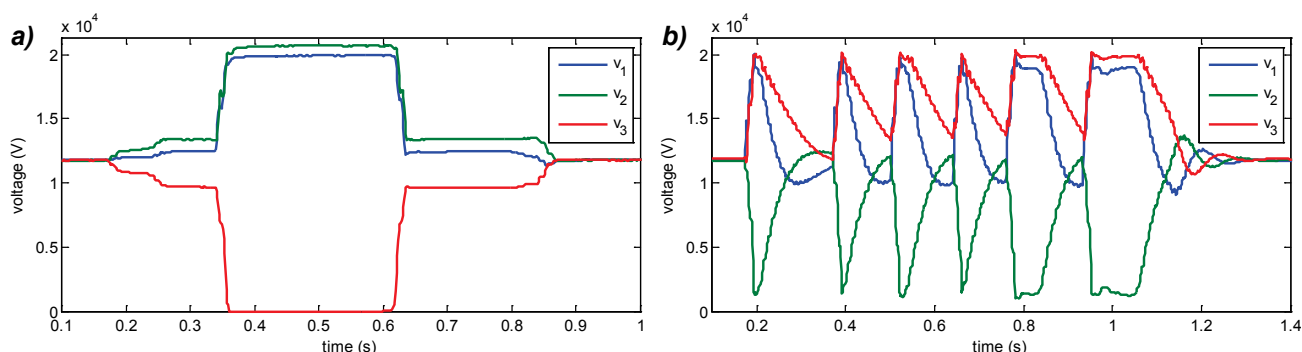
Sur la partie HTA des réseaux de distribution, les défauts sont classifiés en fonction du nombre de phases court-circuitées et de la présence d'un contact direct avec la terre [EDF94b].

On distingue *quatre types de défauts simples* : les *défauts monophasés* (mise en contact d'une phase avec la terre), les *défauts biphasés isolés* (court-circuit entre deux phases), les *défauts biphasés à la terre* (mise en contact de deux phases avec la terre) et les *défauts triphasés* (court-circuit entre les trois phases avec ou sans contact avec la terre).

Deux catégories supplémentaires de défauts sont également rencontrées sur les réseaux : les *défauts évolutifs* (évolution d'un premier type de défauts vers une seconde catégorie) et les *défauts multiples* (présence simultanée de plusieurs défauts à des endroits différents en aval du jeu de barres du poste source).

Les perturbations engendrées par ces défauts sont différentes de celles liées aux enclenchements de transformateurs ou de batteries de condensateurs : ce sont les seules susceptibles de présenter un régime permanent, c'est-à-dire un intervalle temporel durant lequel les amplitudes et les composantes fréquentielles des formes d'onde n'évoluent plus (Figure 2-6.a). Cette stabilité temporaire est liée à l'instauration d'un nouveau régime de fonctionnement du réseau après l'apparition du défaut sur le réseau. Ce régime perdure jusqu'à l'auto-extinction du défaut ou jusqu'à son élimination par une protection. Leurs transitoires d'apparition, d'évolution et de disparition séparant les différents régimes de fonctionnement permanents sont très brefs. Dans la grande majorité des cas, ils sont très inférieurs à une période.

Seuls les défauts monophasés affectant les réseaux de distribution à neutre compensé se comportent différemment [EDF94a]. Ils présentent deux régimes transitoires distincts : un transitoire d'apparition de la perturbation dépendant de la résistance du défaut, de l'impédance de mise à la terre du neutre et du capacitif du réseau et un transitoire d'extinction dépendant essentiellement des caractéristiques du réseau. Si tous deux présentent un comportement sinusoïdal amorti à basse fréquence, les transitoires d'apparition des défauts s'atténuent plus vite [FER95, BER98]. En raison de leur tendance à l'auto-extinction, ces défauts ont une particularité supplémentaire : certains sont auto-extincteurs ou réamorçants et ne présentent pas de régime permanent entre deux régimes transitoires successifs (Figure 2-6.b).



**Figure 2-6 – Mesures des valeurs efficaces des tensions simples en présence d'un défaut monophasé sur un réseau à neutre impédant (a) et un réseau compensé (b)**

### 2.4. Enclenchements de transformateurs et de départs

Les enclenchements et réenclenchements de départs sont des événements courants sur les réseaux de distribution. Ils interviennent généralement à la fin d'un cycle de protection. Comme ils font suite à la déconnexion d'un départ en défaut, les transformateurs du départ sont réenclenchés en charge. L'ensemble des transformateurs des postes HTA/BT ainsi que les auto-transformateurs du réseau situés sur le départ en aval du jeu de barres sont concernés par ce phénomène. Ces transformateurs ont des caractéristiques de puissance, de couplage ou de saturation variées. Chacun d'eux contribue différemment à la perturbation engendrée à l'enclenchement. Le comportement observé correspond à celui d'un transformateur de plus forte puissance. En 1<sup>re</sup> approximation, l'ensemble des

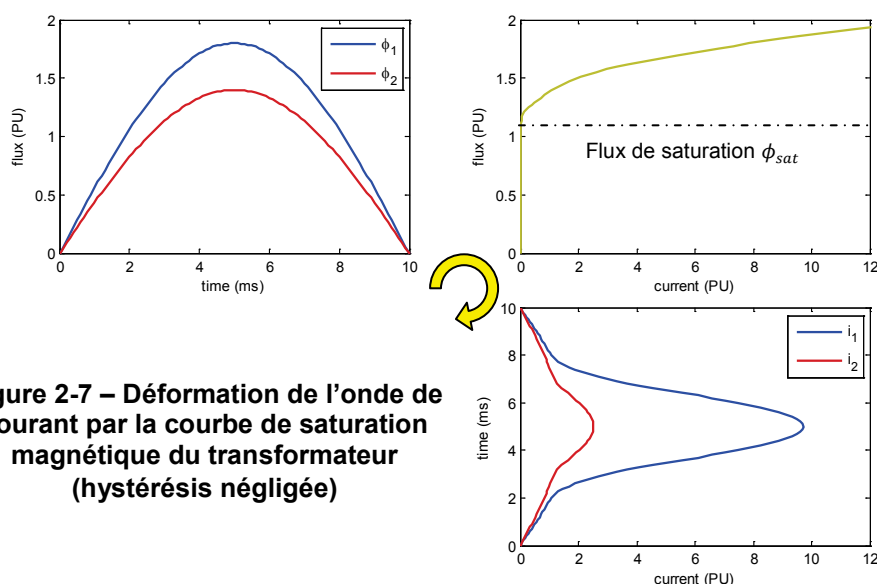


transformateurs à l'origine de la perturbation peut être représenté par un modèle équivalent résultant de leur agrégation. Ce transformateur agrégé sert de support à la présentation des caractéristiques de la perturbation observée lors des enclenchements de départs.

### Caractéristiques de la perturbation

La perturbation d'enclenchement présente un comportement caractéristique. A la connexion d'un départ, le caractère inductif des transformateurs introduit une composante continue exponentiellement décroissante qui se superpose aux formes d'onde des tensions. L'effet de cette composante sur les courants est amplifié par la saturation du noyau magnétique du transformateur : le flux magnétique présent dans les enroulements peut dépasser la limite de saturation du transformateur dans les instants suivant l'enclenchement et créer un fort appel de courant. Sa valeur peut atteindre de 10 à 15 fois celle du courant nominal du transformateur équivalent [GAR01, WAT02] (Figure 2-7). L'importance du courant d'enclenchement est également conditionnée par la distribution du flux rémanent, c'est-à-dire par la répartition du flux conservé par chaque transformateur du départ après sa déconnexion du réseau [RIO09]. En fonction de l'instant d'enclenchement, celui-ci peut soit renforcer l'appel de courant, soit le réduire.

La chute de tension observée à l'enclenchement est issue de la conjonction du courant d'appel dû à la saturation magnétique et du courant de régime permanent dû aux charges reconnectées au réseau [HEA98, KUL04].

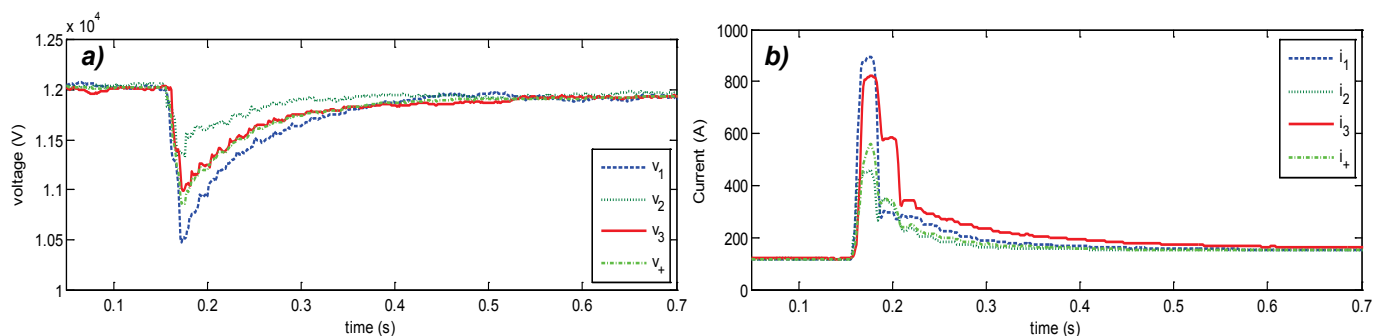


**Figure 2-7 – Déformation de l'onde de courant par la courbe de saturation magnétique du transformateur (hystérésis négligée)**

La saturation du noyau des transformateurs affecte également la signature fréquentielle des formes d'onde au cours du transitoire d'enclenchement. Elle est à l'origine de perturbations harmoniques importantes et fait apparaître des harmoniques normalement absents des réseaux en régime de fonctionnement normal, c'est-à-dire des harmoniques pairs [GU04].

Durant le transitoire d'enclenchement, un grand nombre de grandeurs électrotechniques suit un comportement quasi-exponentiel (Figure 2-8). La constante de temps du modèle n'est toutefois pas

constante sur l'intégralité de la durée du transitoire car elle varie avec la saturation du noyau. Plus faible au début de l'enclenchement, elle augmente progressivement jusqu'à atteindre une valeur asymptotique correspondant au comportement en régime non saturé [KUL04]. En pratique, ce comportement est négligé pour les enclenchements en charge car la valeur asymptotique est atteinte très rapidement (en moins d'une demi-période généralement).



**Figure 2-8 – Comportement des valeurs efficaces [des tensions (a) et des courants (b)] au jeu de barres du poste source lors du réenclenchement d'un départ**

### Paramètres conditionnant la perturbation d'enclenchement

Le comportement des formes d'onde à l'enclenchement d'un départ est impacté par plusieurs paramètres. Deux sont, en particulier, prépondérants : l'instant de reconnexion du départ et la distribution du flux rémanent dans les enroulements de ses transformateurs HTA/BT.

L'instant d'enclenchement du premier pôle du départ ainsi que la dispersion des instants de connexion des deux autres influencent les variations du flux présent sur les chemins magnétiques du transformateur équivalent. Plus le flux d'une phase est important, plus l'appel de courant est marqué. Le cas le plus défavorable correspond à l'enclenchement du premier pôle au passage par zéro de la tension. En l'absence de flux rémanent, le flux magnétique induit dans la colonne du transformateur peut atteindre deux fois la valeur du flux nominal  $\phi_n$ . La limite de saturation étant dépassée ( $2\phi_n > \phi_{Sat}$ ), un appel de courant intense est induit (Figure 2-7) [BEL95, KUL04, RIO00].

La valeur et la répartition du flux rémanent dans le noyau magnétique sont également déterminants dans le comportement de la perturbation [HEA98, RIO09]. En effet, à la déconnexion du départ, un flux perdure dans les noyaux des transformateurs HTA/BT. En pratique, ce flux peut atteindre des valeurs telles que  $\phi_{rémanent} \sim 0,7 \phi_n$ . Sa distribution dépend de l'architecture du transformateur, de son couplage ainsi que de l'instant de sa déconnexion. Il constitue un facteur aggravant de la saturation magnétique car il s'additionne au flux naturellement produit par l'enclenchement. Dans le cas le plus défavorable, le flux total observé à la suite de l'enclenchement est égal à :  $\phi_{total} = \phi_{rémanent} + 2\phi_n$ . On distingue classiquement deux types de répartitions de flux rémanent [RIO00].

D'autres facteurs comme la puissance de court-circuit du réseau ou les caractéristiques des charges en aval du transformateur influencent également l'amplitude du courant d'appel et le temps de rétablissement du système.

## 2.5. Enclenchements de batteries de condensateurs

Les batteries de condensateurs sont couramment utilisées sur le réseau de distribution pour contrôler la puissance réactive d'une installation ou d'un réseau, limiter la charge d'un équipement ou régler le niveau de tension. Elles sont connectées et déconnectées selon les besoins. Contrairement aux perturbations générées par les enclenchements de départs, elles ne sont pas corrélées à l'apparition de défauts sur le réseau. Elles dépendent essentiellement de la consommation des charges connectées en aval du point de compensation [DUG04, EDF87].

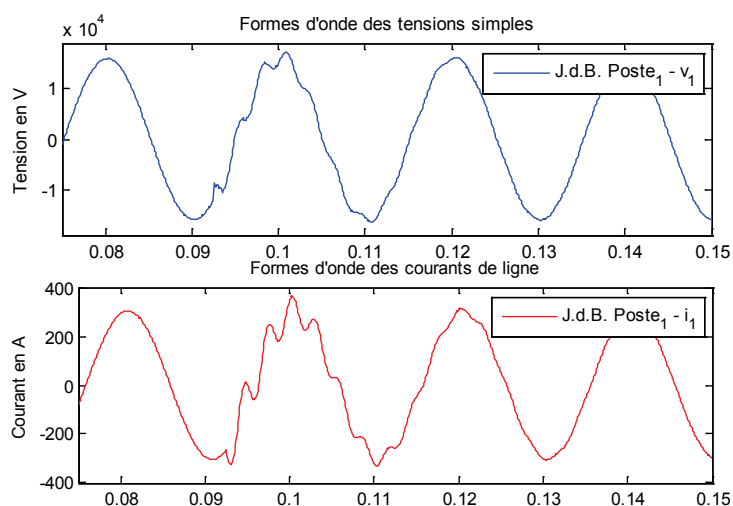
Comme la consommation du réactif évolue sur une journée, les opérations de commutation des batteries de condensateurs surviennent régulièrement sur le réseau. Elles produisent des perturbations transitoires de forte amplitude et de courte durée qui ont pour origine un phénomène physique très simple : la tension aux bornes d'un condensateur ne peut changer instantanément. La perturbation oscillatoire observée résulte du passage d'un état déchargé (niveau de tension nul) à un fonctionnement à tension nominale de la batterie.

### Caractéristiques de la perturbation

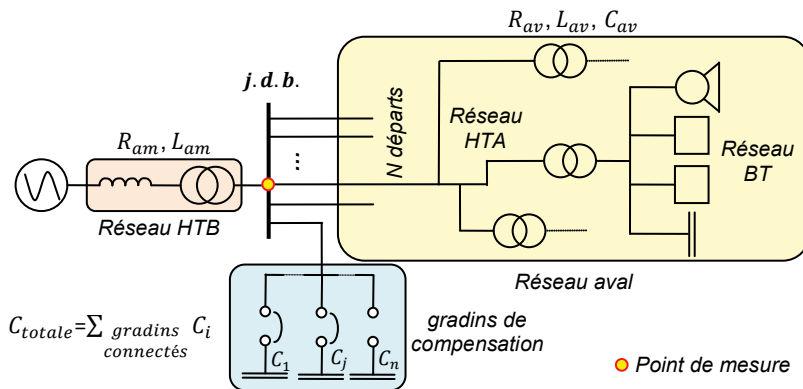
La perturbation d'enclenchement générée par le couplage d'un gradin de condensateurs sur le réseau présente un comportement caractéristique (Figure 2-9). Il s'agit d'une perturbation de courte durée : elle dure moins de deux périodes en l'absence de phénomène de résonance. Elle introduit dans les formes d'onde des composantes sinusoïdales amorties de hautes fréquences qui se superposent au régime permanent. La fréquence principale de ce transitoire dépend de la capacité totale  $C_{Totale}$  de la batterie connectée au réseau après l'enclenchement du gradin et de l'impédance du réseau amont ( $L_{Amont}$ ) (Figure 2-10). Elle varie typiquement entre 300 Hz et 1 kHz et peut être approximée par la relation (2-1). Son amplitude est bornée en tension et en courant [NAT05, KEU07].

$$\omega_{C1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{Amont} C_{Totale}}}$$

(2-1)



**Figure 2-9 – Forme d'onde des tensions et des courants au jeu de barres du poste source suite à l'enclenchement d'un gradin de condensateurs au poste**



**Figure 2-10 – Schéma monophasé équivalent présentant les principaux paramètres conditionnant les perturbations d'enclenchement d'un gradin observé du jeu de barres du poste HTB-HTA**

D'autres composantes fréquentielles sont également présentes dans ces transitoires. Elles sont principalement liées à la topologie du réseau aval et en particulier à ses boucles secondaires. On citera notamment la boucle impliquée lors des enclenchements couplés ou « back-to-back » qui est constituée par les capacités de deux éléments capacitifs voisins et par l'inductance du réseau qui les sépare. Ces fréquences secondaires sont généralement comprises entre 1 et 8 kHz.

Les transitoires d'enclenchement des batteries impactent directement les niveaux des tensions et des courants relevés sur le réseau. Une chute de tension  $\Delta V_{VCC}$  apparaît quasi-instantanément à l'enclenchement du gradin. Sa valeur dépend principalement du rapport entre la capacité du gradin enclenché et celle des éléments capacitifs connectés à proximité (2-2). Au cours des premiers instants suivant l'enclenchement de la batterie, d'importantes surtensions et surintensités surviennent de manière transitoire. Le pic de tension  $V_{CC\ max}$  peut atteindre deux fois la valeur crête nominale  $V_{CC\ n}$  et le pic de courant peut dépasser de trois fois le courant de charge [KEU07, KOC97].

$$\frac{\Delta V_{VCC}}{V_{n\ VCC}} \approx \frac{C_{gradins\ connectés}}{C_{gradins\ connectés} + C_{gradin\ enclenché}} = \frac{C_{gradins\ connectés}}{C_{Totale}} \quad (2-2)$$

### **Paramètres conditionnant la perturbation d'enclenchement**

Le comportement de la perturbation observée à l'enclenchement d'une batterie de condensateurs sur le réseau HTA est principalement conditionné par trois paramètres : l'inductance équivalente du réseau amont  $L_{Amont}$  (impédances du transformateur du poste et du réseau HTB), la capacité de la batterie de compensation additionnée à celle déjà enclenchée  $C_{Totale}$  et l'instant de connexion de la batterie au réseau  $t_i$  [JOH95].

- ✓ Les paramètres  $L_{Amont}$  et  $C_{Totale}$  influencent fortement les caractéristiques du transitoire oscillant. Ils définissent sa principale fréquence transitoire  $\omega_{c1}$  et fixent les bornes des amplitudes des oscillations mesurées sur les tensions et les courants.
- ✓ L'instant d'enclenchement de la batterie n'impacte pas les fréquences des composantes spectrales du transitoire. Il impose par contre leur amplitude. La dispersion des instants de connexions des pôles de l'interrupteur influence également le comportement des perturbations de manière limitée. En ne commutant pas de manière synchrone, ils introduisent pendant quelques millisecondes un court déséquilibre entre les différentes phases du réseau.

## Chapitre 3 – Méthodes d'analyse des perturbations

### 3.1. Architecture des systèmes de reconnaissance

La poursuite des objectifs de caractérisation, d'identification et de localisation des événements survenant sur le réseau de distribution HTA requiert l'utilisation de systèmes de reconnaissance automatique. De tels systèmes sont classiquement composés de trois étapes réalisées de manière séquentielle (Figure 3-1) [GAO99, GU04, POI00, IGN06].

- ✓ L'étape de *segmentation* des formes d'onde est une étape incontournable pour les systèmes de reconnaissance. Elle décompose les perturbations en une succession de phases significatives. Elle est essentielle à l'interprétation correcte des perturbations. Sa capacité à détecter l'ensemble de ces phases et à les estimer de manière précise impacte fortement les performances du système de reconnaissance. Cette étape s'appuie sur le traitement des formes d'onde par différentes méthodes de filtrage pour déterminer les séparations entre chaque segment.
- ✓ L'étape de *caractérisation* des perturbations est l'étape intermédiaire du système. Elle exploite les formes d'onde des perturbations et leur décomposition en phases significatives. Pour chacun des segments identifiés, elle détermine un ensemble d'indicateurs qu'elle emploie pour décrire la perturbation détectée. Ces indicateurs sont obtenus par différentes méthodes telles que l'analyse de grandeurs électrotechniques classiques ou l'identification de modèles comportementaux.
- ✓ L'étape d'*identification* des perturbations utilise différents types d'indicateurs pour déterminer le type et la direction de la perturbation. Cette 3<sup>e</sup> étape repose sur un système de décision construit soit sur un système expert, soit sur un système à reconnaissance supervisée. Selon la méthode adoptée, le système renvoie, en plus de l'identification de la perturbation, une estimation de la vraisemblance de la classe d'événements identifiée.

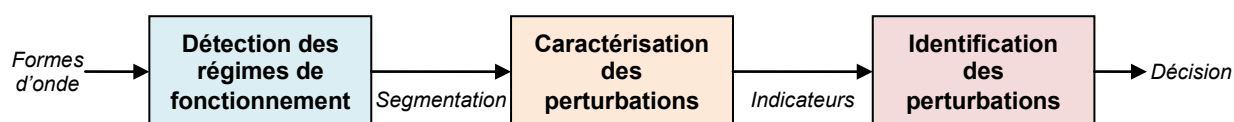


Figure 3-1 – Architecture classique des systèmes de reconnaissance

Les structures de reconnaissance constituées de trois étapes distinctes sont majoritaires parmi les systèmes de reconnaissance exploitant les formes d'onde des perturbations. Toutefois, dans certains cas, ces étapes sont plus difficilement dissociables. Au sein de tels systèmes, les grandeurs analysées pour la segmentation servent également de grandeurs discriminantes pour la caractérisation et l'identification des perturbations détectées [STY02b, NAJ09].

### 3.2. Analyse des formes d'onde

De nombreuses méthodes analysent les formes d'onde mesurées sur les réseaux de distribution à la recherche d'informations telles que l'amplitude du fondamental, les niveaux d'harmoniques, les composantes symétriques ou la répartition de l'énergie du signal dans l'espace temps-fréquence.

Les informations obtenues sont utilisées à différentes fins. Dans un algorithme de segmentation, elles sont exploitées afin de distinguer les différents régimes de fonctionnement du réseau, c'est-à-dire les phases d'apparition, d'évolution et de disparition des perturbations. Employées au sein d'un système de reconnaissance, elles caractérisent les comportements permanents et transitoires des perturbations. Cette caractérisation requiert l'utilisation de méthodes appropriées : si la spécification des régimes permanents pose peu de difficultés, celle des régimes transitoires est plus problématique en raison de leurs dynamiques différentes.

Dans ce paragraphe, plusieurs méthodes couramment utilisées pour analyser les formes d'onde mesurées sur les réseaux électriques sont présentées.

#### 3.2.1. Grandeurs électrotechniques classiques

Un grand nombre de systèmes de reconnaissance des perturbations repose sur des grandeurs électrotechniques telles que les valeurs efficaces [STY02b], les composantes symétriques [BO703] ou les puissances [PAR00]. Elles sont utilisées pour décrire les perturbations produites par des événements électrotechniques. Ces grandeurs sont généralement déterminées sur une fenêtre d'observation glissante de taille limitée, typiquement égale à une période avec une fréquence de rafraîchissement de leurs évaluations inférieure à une demi-période. Ces tailles de fenêtres et fréquences de calculs assurent un meilleur suivi de leurs variations. Pour des applications bien particulières, des fenêtres réduites de largeur égale à une demi-période sont aussi utilisées [GU04].

Le calcul d'un grand nombre de ces grandeurs est basé sur la décomposition des formes d'onde en série de Fourier déterminée par DFT (Discrete Fourier Transform). Pour leur assurer une plus grande stabilité, les fenêtres d'observation utilisées sont ajustées à la fréquence fondamentale. Un échantillonnage du signal à une fréquence proportionnelle au fondamental réduirait idéalement les erreurs dues à l'utilisation d'un signal numérique et permettrait de s'affranchir du rééchantillonnage du signal [IEC430, WAN04]. Une problématique similaire est rencontrée pour le calcul de grandeurs telles que les valeurs efficaces (valeurs RMS).

Parfois, les propriétés des grandeurs estimées par les méthodes de calcul classiques (RMS, DFT) sont insuffisantes pour décrire certaines particularités des perturbations. Ces insuffisances sont généralement liées à une dynamique ou une résolution trop faible du traitement. Pour y pallier, des méthodes d'estimation paramétrique telles que le filtrage de Kalman ou le filtrage adaptatif par moindres carrés récursifs (RLS) sont utilisées pour calculer ces grandeurs [DAS98, FLO03].

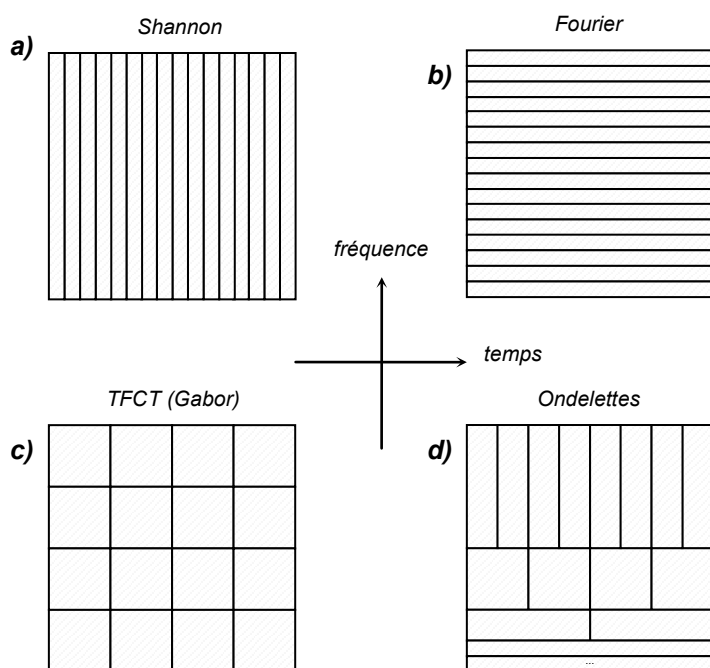
### 3.2.2. Estimation de la fréquence fondamentale

Le suivi de la fréquence fondamentale des formes d'onde est essentiel pour de nombreuses méthodes d'analyse des formes d'onde. Elle influence, par exemple, la précision des méthodes qui examinent le signal avec une fenêtre glissante dont la taille est indexée sur le fondamental. Elle intervient également dans des méthodes exploitant des modèles harmoniques. Son estimation doit être suffisamment précise et robuste au bruit et aux perturbations harmoniques et interharmoniques pour limiter les erreurs de calculs de ces méthodes.

Différents types de méthodes d'estimation sont proposés dans la littérature. Plusieurs variantes reposent sur l'exploitation directe de la forme d'onde : après un pré-traitement de l'onde (filtrage passe-bas, intégration...), elles estiment sa fréquence à partir de ses passages par zéro [BEG93] ou par calcul de DFT [LAI99, LOB97, WAN03]. D'autres méthodes utilisent une approche paramétrique pour estimer cette fréquence [DAS98, TER94]. Des méthodes fondées sur le principe d'ESPRIT ou de MUSIC évaluent cette fréquence en calculant les paramètres de modèles sinusoïdaux dont les fréquences sont libres. D'autres méthodes telles que l'EKF (Extended Kalman Filter) suivent un modèle harmonique dont la fréquence fondamentale est un paramètre à évaluer [DAS99c].

### 3.2.3. Analyse temps-fréquence

Différentes méthodes d'analyse suivent la répartition des composantes spectrales contenues dans les formes d'onde au cours de l'intervalle d'observation. Elles sont désignées par le terme de méthodes « temps-fréquence ». En fonction de la méthode choisie et de sa mise en œuvre, la précision avec laquelle le signal est observé varie en temps et en fréquence (Figure 3-2).



**Figure 3-2 – Comparaison des pavages les plus courants de l'espace temps-fréquence**

L'ensemble de ces méthodes vérifie l'inégalité d'Heisenberg [KIE08]. Cette inégalité renseigne sur l'incertitude minimale d'une représentation temps-fréquence d'un signal. Cette incertitude n'étant jamais nulle, une représentation temps-fréquence ne fournit pas les instants précis auxquels le contenu spectral de la forme d'onde évolue. Elle détermine uniquement les intervalles sur lesquels certaines bandes de fréquences existent.

Pour l'analyse des événements électrotechniques, les régimes transitoires des perturbations sont essentiellement caractérisés par les bandes spectrales les plus élevées tandis que pour les régimes permanents, ce sont celles de plus basses fréquences qui renseignent sur la perturbation. Les informations tirées de ces décompositions sont ensuite interprétées et utilisées pour segmenter et caractériser les perturbations.

### **Transformée de Fourier à Court Terme (TFCT)**

La TFCT dérive directement de l'analyse de Fourier. Elle analyse le signal sur une fenêtre d'observation de largeur limitée sur laquelle elle suppose le signal parfaitement stationnaire (3-1). Comme la taille de la fenêtre utilisée est fixe, l'ensemble de l'espace temps-fréquence est observé avec une résolution constante en temps et en fréquence (Figure 3-2-c). Les transitoires lents et rapides sont donc examinés avec des filtres de qualité identique (Figure 3-4-b) [SHI99].

Différents types de fenêtres d'observation sont utilisés pour améliorer certaines propriétés d'observation des formes d'onde, telles que leur capacité à dissocier des composantes fréquentielles ou des événements temporels proches... Les fenêtres de Hamming et de Hann sont les plus courantes pour notre application. On note que si les signaux étaient observés avec une fenêtre rectangulaire, le calcul de la TFCT équivaldrait au calcul glissant d'une FFT ou d'une DFT.

$$F_y^Y(\tau, f) = \sum_{n=1}^N y(nT_e) \gamma^*(nT_e - \tau) e^{-j2\pi f n T_e} \quad (3-1)$$

Où :  $\gamma(\cdot)$  est la fenêtre d'observation du signal  
 $N$  est la taille de la fenêtre d'observation  
 $T_e$  est le pas d'échantillonnage des formes d'onde  $T_e = 1/f_e$

### **Transformée en ondelettes**

La transformée en ondelettes est une alternative au calcul de la TFCT dont elle pallie certains défauts. Elle fournit une représentation temps-fréquence du signal avec une résolution variable grâce à des opérations de dilation (facteur  $a$ ) et de translation (facteur  $b$ ) sur l'ondelette d'analyse utilisée  $\Psi(\cdot)$  (3-2) (Figure 3-2-d). Plusieurs familles d'ondelettes sont utilisées pour traiter les formes d'onde des perturbations. Les ondelettes de Daubechies [GU00b, SAN00a] et Coiflet [CAU10a] sont les plus répandues pour l'analyse des perturbations électrotechniques. Selon le type d'applications envisagées, le signal peut être analysé à l'aide d'ondelettes continues (CWT - Figure 3-4-c) ou discrètes (DWT - Figure 3-4-d) [POI00].

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3-2)$$



L'une des méthodes d'analyse les plus courantes consiste à décomposer le signal sur un pavage dyadique de l'espace temps-fréquence [GAO99, ZHU04]. Cette analyse multi-résolution (MRA) des formes d'onde (3-3) correspond à l'application successive de filtres passe-bas  $g_{LP}$  et passe-haut  $g_{HP}$  déterminés à partir d'une famille d'ondelettes discrètes (Figure 3-3). Cette structure a l'avantage de proposer une importante résolution temporelle aux hautes fréquences et une grande précision fréquentielle pour les basses fréquences. Sa complexité algorithmique est également limitée.

$$W_y^{\psi}(m, k) = \sum_{n=1}^N y(nT_e) \Psi_{m,k}^*(nT_e) = \sum_{n=1}^N y(nT_e) 2^{-k/2} \Psi^*(2^{-k}nT_e - mT_e) \quad (3-3)$$

Où :  $\Psi_{m,k}(t) = 2^{-k/2} \Psi(2^{-k}t - mT_e)$  avec  $\Psi(\cdot)$  l'ondelette d'analyse utilisée

$a_k = 2^k$  est le facteur de dilatation du pavage dyadique

$b_{mk} = m2^kT_e$  est le facteur de translation du pavage dyadique

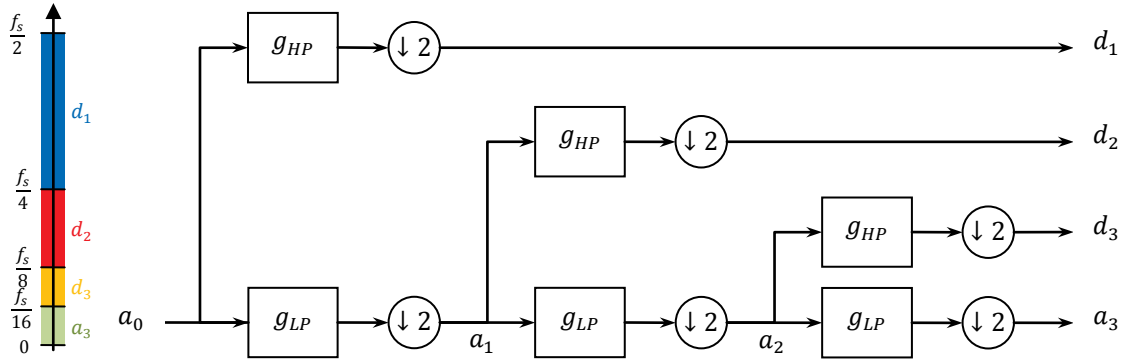
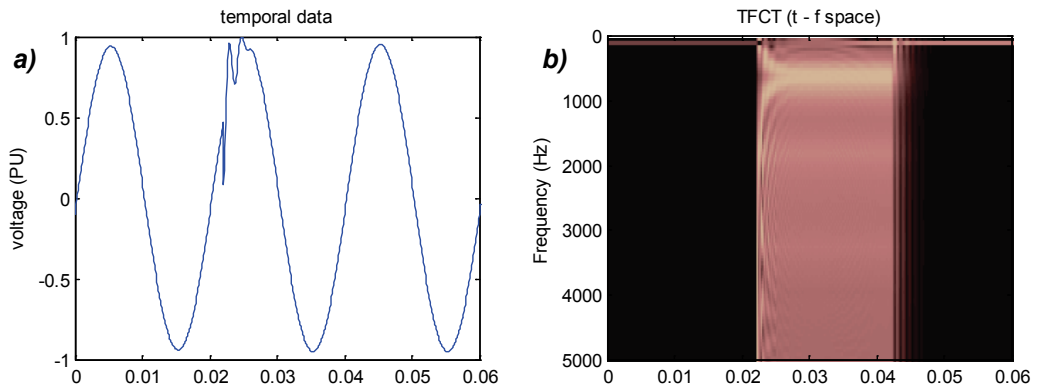
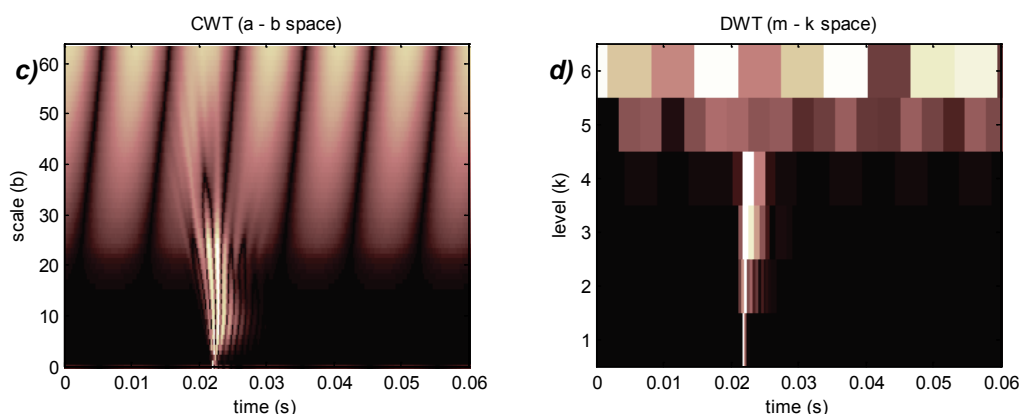


Figure 3-3 – Schéma d'analyse d'un signal par MRA

### Autres transformées temps-fréquence

Si la TFCT et la MRA sont les deux méthodes d'analyse temps-fréquence les plus couramment employées, d'autres méthodes sont aussi utilisées pour traiter les ondes de tension et de courant mesurées sur le réseau. La transformée en S [DAS03, LEE03] ou la transformée de Wigner-Ville et ses variantes [SHI99, SHI08] fournissent de nombreuses informations sur les perturbations et sont employées dans des contextes de reconnaissance ou de localisation.





**Figure 3-4 – Observation d'un enclenchement de batterie de condensateurs**

a) Valeur instantanée de la tension      b) TCFT sur une fenêtre de largeur  $T_0$   
 c) CWT avec ondelette db4      d) DWT avec ondelette db4 (level1 : 2.5-5 kHz, level6 : 78-156 HZ)

### 3.2.4. Estimation spectrale paramétrique

Contrairement aux méthodes d'analyse temps-fréquence, les méthodes d'estimation paramétrique déterminent les coefficients d'un modèle d'ordre et de type préalablement définis. Elles supposent *a minima* la connaissance ou la prédétermination du nombre de composantes spectrales principales contenues dans les formes d'onde analysées ainsi que de leur type. Cet *a priori* conditionne fortement la qualité de l'estimation.

#### Modélisation des formes d'onde

Trois familles de modèles sont couramment utilisées pour analyser les formes d'onde relevées sur les réseaux électriques : les modèles harmoniques, les modèles sinusoïdaux et les modèles sinusoïdaux amortis. Chacun de ces modèles autorise des degrés de liberté croissants.

- Les *modèles harmoniques* reposent sur l'hypothèse selon laquelle les régimes permanents des formes d'onde observées sur les réseaux HTA peuvent être approximés par un nombre limité de composantes harmoniques. Suivant l'application, la fréquence du fondamental est considérée constante [STY02a, DAS96, DAS98] ou variable [DAS99c].
- Les *modèles sinusoïdaux* sont la généralisation du modèle précédent. Ils considèrent que le signal comporte un nombre limité de sinusoïdes de fréquences inconnues. Ils permettent l'observation de composantes fréquentielles interharmoniques [GU08, CHA95].
- Les *modèles sinusoïdaux amortis* tiennent compte d'un élément supplémentaire : l'amortissement des composantes fréquentielles. Ce nouveau degré de liberté permet de caractériser certains régimes transitoires des perturbations [GU00a].

Le modèle sélectionné conditionne fortement le type de procédé d'estimation employé et la robustesse de l'évaluation des paramètres. Les principales méthodes d'estimation utilisées sont brièvement présentées dans ce document.

### **Filtrage de Kalman**

Un filtre de Kalman est un estimateur récursif capable d'évaluer les paramètres d'un système observé à partir d'un modèle d'état préalablement défini. Il est composé de deux parties distinctes assurant respectivement le filtrage des données d'entrée et la prédiction du signal observé [KAL60].

Deux types de filtres sont couramment associés à un modèle harmonique des formes d'onde. Le filtre de Kalman linéaire suppose que la fréquence fondamentale du modèle sur lequel se base le système est connue et constante sur l'ensemble de l'intervalle d'estimation. Il détermine l'amplitude et la phase de chaque composante incluse dans le modèle ainsi que l'erreur d'estimation [GU03, STY02a, FLO03]. Le second type de filtre est le filtre de Kalman étendu (en Anglais, Extended Kalman Filter ou EKF). Il exploite un système non-linéaire dans lequel l'hypothèse précédente est relaxée. Il fournit en outre une estimation de la fréquence fondamentale de la forme d'onde analysée [DAS99c].

### **Filtrage adaptatif par moindres carrés récursifs (RLS)**

Un filtre adaptatif est une méthode d'estimation minimisant l'erreur quadratique moyenne entre un signal et sa modélisation paramétrique linéaire. Il est associé à des modèles harmoniques [DAS98] ou sinusoïdaux amortis [GU00a] pour analyser les formes d'onde mesurées sur les réseaux électriques. Quel que soit le modèle utilisé, il estime l'erreur de modélisation ainsi que les différents paramètres des composantes spectrales du modèle. Afin d'obtenir une estimation optimale, le choix de l'ordre du modèle joue un rôle essentiel [KAY88].

Le processus d'estimation adaptatif est réalisé, soit sur un intervalle d'observation croissant avec une pondération exponentielle, soit sur une fenêtre glissante de taille fixe. C'est ce dernier type de fenêtre qui est retenu pour l'analyse des formes d'onde des perturbations [RES97, GU00a]. Différentes méthodes sont utilisées pour évaluer les composantes du signal à partir de son observation. Pour des modèles auto-régressifs, des estimateurs spectraux de type Burg, covariance et leurs variantes sont employés [KAY88, CAU11b].

### **Méthodes à « Haute-Résolution »**

Les méthodes dites à « Haute Résolution » sont des méthodes paramétriques qui décomposent le signal observé en une série de sinusoïdes simples ou de sinusoïdes amorties [FLE01]. Ces méthodes déterminent les fréquences harmoniques et interharmoniques contenues dans le signal ainsi que le comportement des grandeurs électrotechniques durant certains transitoires des perturbations [DAF02]. Elles tirent leur dénomination « Haute Résolution » de leur capacité à s'affranchir de l'analyse de Fourier en termes de résolution spectrale. Leur principale qualité réside dans leur capacité à détecter des raies spectrales proches. Pour ce faire, elles exploitent les propriétés statistiques des formes d'onde et, en particulier, leur matrice de corrélation.

Parmi les méthodes d'estimation possibles, les méthodes récentes, décomposant les signaux sur des sous-espaces particuliers, sont privilégiées pour analyser le contenu fréquentiel des formes d'onde.

Les méthodes comme MUSIC, ESPRIT [BOL06, GU08] et leurs variantes se distinguent essentiellement par leur sensibilité au choix de l'ordre du modèle et par leur manière de prendre en compte le bruit lors de l'estimation des paramètres du modèle.

### 3.3. Procédés de décomposition des formes d'onde

#### 3.3.1. Principes et objectifs des procédés de décomposition

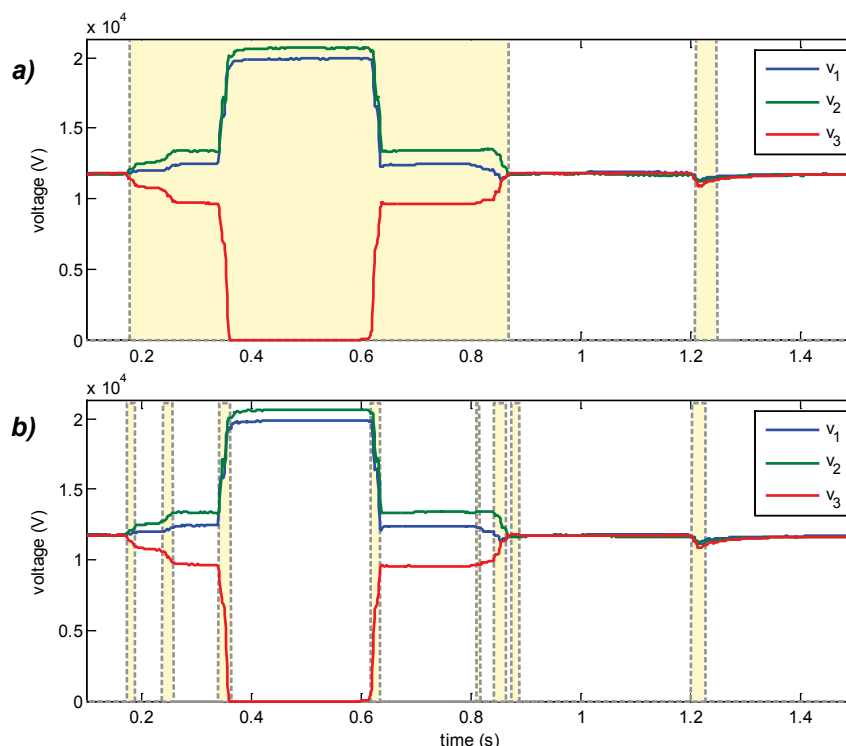
La décomposition des formes d'onde est essentielle au diagnostic des perturbations affectant les réseaux électriques. Divers procédés sont employés pour y parvenir. Leur complexité et les informations qu'ils fournissent dépendent des objectifs poursuivis.

Quel que soit leur contexte d'utilisation, ces procédés sont soumis à d'importantes contraintes de fiabilité. Les taux de fausses alarmes et d'événements non détectés doivent être les plus faibles possibles pour évaluer la qualité de la fourniture d'électricité le plus justement possible.

Les procédés de décomposition sont couramment utilisés dans le cadre de deux applications :

- ✓ Des *algorithmes de détection* sont implantés dans de nombreux appareils de qualimétrie analysant les formes d'onde. Ils détectent la présence d'événements afin d'extraire les formes d'onde des perturbations associées. Ces procédés se contentent de signaler les intervalles au cours desquels le réseau ne fonctionne pas de manière normale [BOL06]. Les décompositions déterminées sont relativement simples. Ces méthodes ne sont utilisées qu'au sein de systèmes de reconnaissance très simplifiés car elles ne détectent pas les évolutions pouvant survenir au cours d'une perturbation (Figure 3-5-a).
- ✓ Les *procédés de segmentation* utilisés au sein des systèmes de reconnaissance décomposent plus finement les perturbations. Les informations qu'ils fournissent sont plus riches puisqu'ils distinguent les régimes de fonctionnement du réseau, c'est-à-dire les intervalles correspondant aux apparitions, évolutions, persistances et disparitions des perturbations (Figure 3-5-b) [GU03, STY02a]. Cette distinction facilite le procédé de reconnaissance, car elle permet de caractériser différemment les régimes transitoires et permanents des formes d'onde. Des jeux d'indicateurs spécifiques à chaque régime de fonctionnement du réseau (transitoire ou permanent) peuvent ainsi être définis. La réalisation de telles décompositions nécessite l'utilisation de méthodes plus complexes pour le traitement des formes d'onde et l'analyse des signaux filtrés.

Ces procédés de segmentation sont soumis à des contraintes supplémentaires, notamment en termes de précision. La qualité des informations déterminées ultérieurement lors de la phase de caractérisation dépend des erreurs réalisées sur la décomposition des formes d'onde. Ce phénomène est particulièrement marqué lorsque les régimes transitoires des perturbations sont analysés [CAU11a].



**Figure 3-5 – Traitement des perturbations par les deux familles de méthodes de décomposition**  
a) Détection de la présence d'une perturbation    b) Distinction des régimes de fonctionnement du réseau

### 3.3.2. Structure des procédés de segmentation

La grande majorité des procédés de segmentation des formes d'onde est constituée de deux modules successifs. Le premier réalise le pré-traitement des formes d'onde, tandis que le second détecte les transitoires des perturbations à partir des informations pré-traitées.

#### Pré-traitement des formes d'onde

Cette étape est destinée à faciliter l'analyse des formes d'onde et à aider à l'extraction des transitoires. Plusieurs catégories de méthodes sont utilisées. Les plus simples calculent les variations des valeurs efficaces des tensions et des courants [PER06a, STY02b]. D'autres utilisent des méthodes de filtrage. Des filtres passe-haut et des bancs de filtres d'ondelettes signalent la présence de régimes transitoires en isolant le contenu haute fréquence des formes d'onde [SAN00a, GAO99]. Des méthodes de filtrage adaptatif telles que les filtres des moindres carrés récurrents [GU00a, DAS98] ou le filtrage de Kalman font apparaître les transitoires des perturbations en comparant les signaux analysés à leur estimation paramétrique [STY02a, GU03].

Selon le traitement sélectionné et sa mise en œuvre, la présence de perturbations transitoires et permanentes influence différemment les signaux fournis par le pré-traitement. Les performances de segmentation du procédé sont donc directement impactées.

### **Système de décision**

Lors de cette seconde étape, les signaux déterminés par le pré-traitement sont exploités par des algorithmes signalant la présence de transitoires dans les formes d'onde.

La plupart des structures de décision utilisées pour distinguer les régimes de fonctionnement successifs du réseau sont très simples. Elles emploient principalement des seuils de détection fixes, déterminés à partir du comportement en régime permanent des signaux analysés [GU00a, STY02a, PER06a]. Quelques méthodes prennent en compte les variations du niveau de bruit des signaux et adaptent leurs seuils en conséquence [GU04, DUQ05, CHU99]. Mais aucune ne tient compte des variations des niveaux harmoniques dans les formes d'onde ou de la présence de perturbations proches.

Une large majorité des méthodes considérées dans ce paragraphe sont évaluées en fonction de leurs performances en termes de capacité de détection, mais très peu considèrent la précision temporelle de leur méthode comme un facteur discriminant. A notre connaissance, seule la publication [LE10] propose une méthode cherchant à améliorer la précision temporelle de l'estimation des segments transitoires des perturbations observées sur les réseaux électriques.

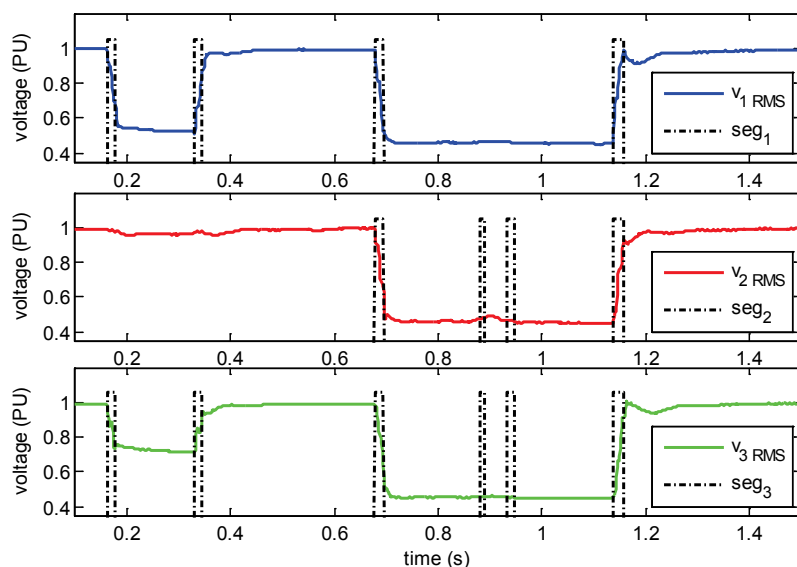
### **3.3.3. Fusion des informations de segmentation**

Les signaux utilisés par les procédés de segmentation sont, soit les formes d'onde des tensions, soit celles des courants, soit celles des deux types. Les méthodes de segmentation les traitent de manière indépendante ou en une seule fois. Dans les deux cas, une unique segmentation est déterminée pour l'ensemble des formes d'onde. Elle permet de réaliser, de manière unifiée, l'analyse et l'identification des perturbations.

Dans le 1<sup>er</sup> cas, une décomposition est déterminée pour chaque forme d'onde. Les formes d'onde étant analysées de manière indépendante, des informations de segmentation différentes peuvent être obtenues (Figure 3-6). Les différences observées entre les décompositions ont essentiellement deux causes. Toutes les formes d'onde ne sont pas nécessairement affectées par la perturbation détectée. Certaines détections peuvent également être erronées. Quelle que soit l'origine de ces différences, les segmentations doivent être rassemblées en une seule décomposition. Pour ce faire, une méthode est régulièrement utilisée. Elle considère les formes d'onde en régime transitoire dès que le transitoire d'une perturbation est détecté sur une forme d'onde. Ce régime transitoire se prolonge tant que l'analyse d'une forme d'onde signale la présence d'un transitoire [PER06b]. Cette méthode a l'avantage d'offrir un taux de détection maximum. Elle maximise par contre le taux de fausses détections puisque chaque segmentation erronée se répercute dans la décomposition finale.

Le 2<sup>nd</sup> cas réalise la fusion des segmentations au cours de l'étape de décision [BOL07, STY02a]. Au lieu de considérer les indices de segmentation un par un, elle utilise leur maximum et décompose les

formes d'onde en analysant cette grandeur. L'emploi du maximum est restrictif car il suppose que le niveau de tous les indices de segmentation est identique en régime permanent. Sur des formes d'onde réelles, différents phénomènes – comme les variations des régimes harmoniques ou le bruit de mesure – font que cette condition n'est pas nécessairement vérifiée. Des perturbations de faible amplitude peuvent ainsi être masquées. Cette caractéristique impacte négativement la capacité de détection du procédé de segmentation ainsi que son taux de fausses alarmes.



**Figure 3-6 – Segmentations obtenues après l'analyse indépendante des formes d'onde des trois tensions**

### 3.4. Caractérisation des perturbations

Tout système d'identification repose sur un ensemble d'indicateurs. Ils sont définis de manière à faire ressortir des informations discriminantes caractérisant la perturbation analysée. Ils permettent de représenter chaque perturbation dans une base commune qui est ensuite utilisée par le module de décision du système de reconnaissance pour la classifier.

Les indicateurs utilisés pour caractériser les perturbations induites par des événements électrotechniques sont variés. Les méthodes employées pour les calculer sont adaptées au type de la perturbation recherchée et au régime de fonctionnement du réseau associé. Cette corrélation des méthodes d'analyse avec la dynamique des perturbations garantit une bonne caractérisation.

Ces indicateurs résultent de :

✓ *l'analyse de grandeurs électrotechniques classiques*

Les grandeurs telles que les valeurs efficaces, les composantes symétriques, les puissances... sont couramment utilisées dans les systèmes de reconnaissance analysant les perturbations électrotechniques. Du fait de leur faible dynamique, elles sont principalement employées pour caractériser les régimes permanents de ces perturbations. Elles servent, par exemple, de support à des systèmes de reconnaissance de défauts [STY02b, BO703]. Elles sont également utilisées pour déterminer leur direction [HAM04, LI03, PAR00].

### ✓ *l'analyse de modèles comportementaux*

Les indicateurs déterminés fournissent des informations précises sur les comportements transitoires des perturbations [RES97]. Ils sont, par exemple, employés pour évaluer la direction de la batterie de condensateurs de compensation responsable du phénomène d'enclenchement à partir de l'analyse des formes d'onde pendant son régime transitoire [HUR08].

### ✓ *l'analyse temps-fréquence du signal*

Suivant le type d'informations recherchées, des méthodes d'analyse temps-fréquence différentes sont utilisées. Les méthodes de type TFCT sont privilégiées pour analyser le contenu harmonique des formes d'onde [BOL06]. Si le contenu de plus haute fréquence des formes d'onde doit être traité, les méthodes temps-fréquence plus évoluées de type transformées en ondelettes ou de Wigner-Ville sont employées. Ces informations sont exploitées pour la caractérisation de perturbations permanentes et transitoires [SAN00a, GAO99, ZHU04].

Deux types d'indicateurs sont fréquemment exploités par les systèmes de reconnaissance.

- ✓ Certains indicateurs sont spécifiques d'un type de perturbations. Ils sont par exemple dédiés à la reconnaissance du type des défauts [BO703, SAN00a] ou à la détermination de la direction de la source de la perturbation [PAR00, HUR08]. D'autres indicateurs sont également exploités avec des informations sur la topologie du réseau de manière à estimer la position de la source de la perturbation [GIR92, CHA95] ou de la batterie de condensateurs à l'origine du phénomène d'enclenchement [SAI04, SHI99].
- ✓ D'autres indicateurs ont une portée plus globale et servent à discriminer l'ensemble des événements recherchés par le système de reconnaissance. Par exemple, des indicateurs renseignant sur la répartition de l'énergie des formes d'onde dans chaque bande spectrale sont utilisés indifféremment pour reconnaître les perturbations provoquées par des défauts, des enclenchements de batteries de condensateurs ou des enclenchements de départs [ZHU04].

Par contre, aucune méthode de caractérisation n'analyse spécifiquement les régimes transitoires et les régimes permanents des perturbations et les traite de manière différenciée.

## **3.5. Systèmes d'identification**

Les systèmes d'identification analysent les informations extraites des formes d'onde mesurées sur le réseau lors de la phase de caractérisation. Suivant l'application envisagée, ils évaluent le type, la direction ou la localisation de la perturbation détectée. Pour mener à bien leur fonction, ils requièrent des informations temporelles sur les phases de la perturbation. Cette propriété est indépendante du fait que les étapes de segmentation et d'identification soient fusionnées ou non. Dans les deux cas, elle s'avère nécessaire.



Deux familles de systèmes de décision sont principalement utilisées pour la reconnaissance des perturbations survenant sur les réseaux électriques :

✓ les systèmes de décision de type « expert » (Figure 3-7)

Les systèmes experts sont les systèmes de décision les plus anciens. Ils reposent sur un ou plusieurs critères fixés par l'utilisateur pour assurer leur fonction de discrimination. Ces critères sont déterminés de différentes manières. Ils sont établis à partir de relations mathématiques, de considérations physiques ou de constatations tirées du dépouillement d'enregistrements réels et simulés. En raison de leur grande simplicité, ils sont utilisés autant dans des problèmes d'identification des classes de perturbations [BO703, IGN06] que dans des problèmes de recherche de leur direction [HAM04, LI03].

Leur structure peut être préalablement imposée par l'utilisateur [CAR88, KEZ93]. Plusieurs raffinements ont été apportés aux modèles de décision originaux en introduisant des fonctions de logique floue [CHO97, DAS00]. Une structure optimale peut également être recherchée lors d'une phase d'apprentissage à partir d'une base d'événements [ADB04].

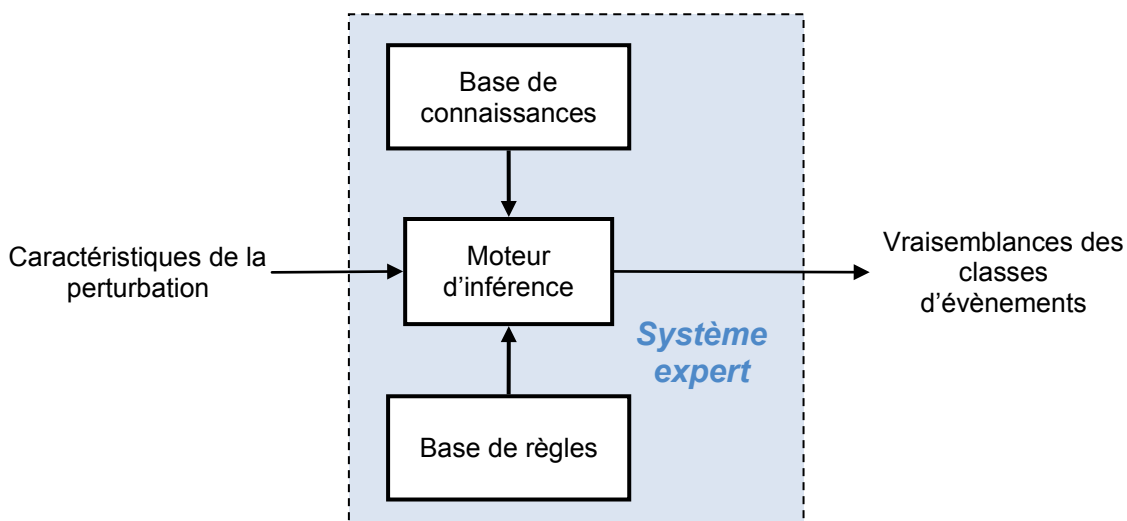
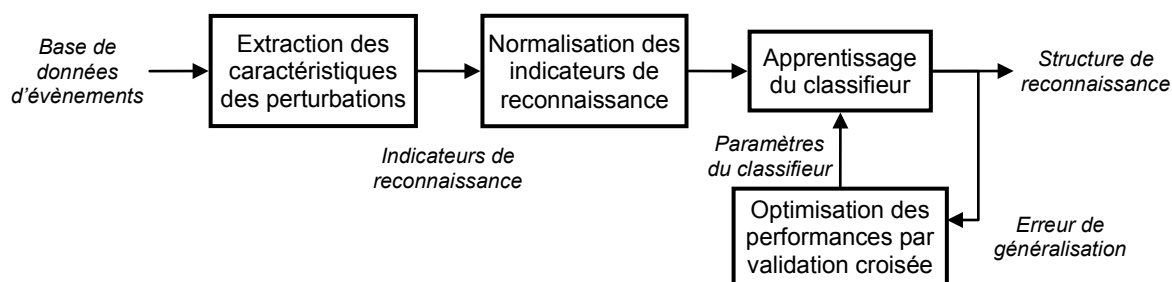


Figure 3-7 – Schéma simplifié d'un système de reconnaissance expert

✓ les systèmes de classification à apprentissage supervisé

Cette catégorie de méthodes se pose comme une alternative aux systèmes experts. Ces systèmes utilisent les indicateurs caractérisant le comportement des perturbations, mais les critères qu'ils définissent pour procéder à la classification des événements ne sont pas imposés directement à ces indicateurs : ils n'interviennent généralement pas dans l'espace des indicateurs original. A partir d'une base d'apprentissage, ils déterminent un modèle de données qu'ils utilisent ensuite pour discriminer les nouvelles perturbations [AXE07, BOL07].

Quelle que soit la méthode de classification utilisée, ces classifieurs suivent un schéma d'apprentissage similaire. La Figure 3-8 en illustre les principales étapes.

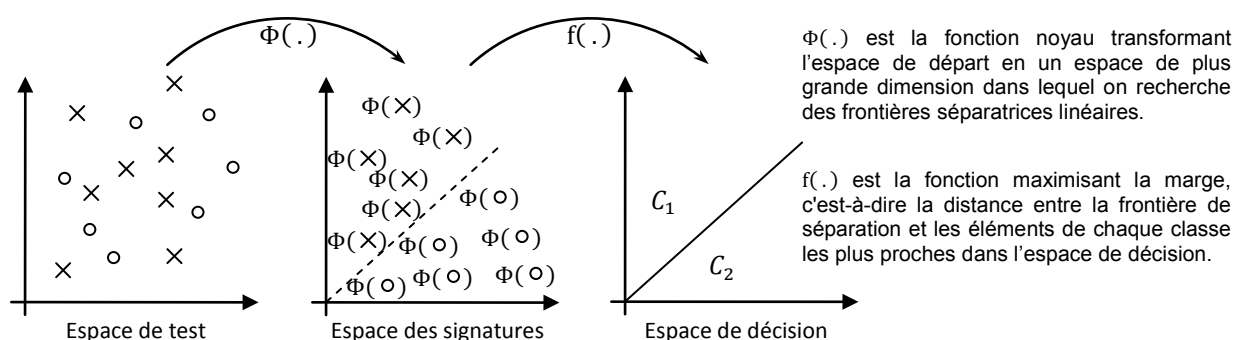


**Figure 3-8 – Schéma générique d'apprentissage des méthodes à apprentissage supervisé**

Les performances de ces systèmes dépendent fortement de leur mise en œuvre et de la qualité des informations avec lesquelles ils sont alimentés. L'utilisateur ne pouvant intervenir sur les opérations d'apprentissage et de test, des méthodes spécifiques telles que la *validation-croisée* [AXE07, REF09] doivent être utilisées pour optimiser et évaluer ces classifieurs.

De nombreuses variantes des méthodes de classification à apprentissage supervisé ont été appliquées dans le domaine de l'identification des perturbations électrotechniques causées par les défauts, les phénomènes d'enclenchement ou les perturbations harmoniques. On citera entre autres les systèmes basés sur des réseaux de neurones (en Anglais, *Artificial Neural Network* ou ANN) [GHO95, REA07, SAN00a] ou les machines à vecteurs de support (en Anglais, *Support Vector Machine* ou SVM) [AXE07, EKI09, LIN08] (Figure 3-9).

Des précisions sur le principe et la mise en œuvre des SVM appliqués aux problèmes de discrimination bi-classes et multi-classes sont données en Annexe D.



**Figure 3-9 – Principe de séparation de deux classes  $C_1$  et  $C_2$  par la méthode SVM [BOL07]**

Par contre, aucun système de reconnaissance n'identifie les différentes perturbations électrotechniques affectant les réseaux de distribution HTA en analysant leurs régimes transitoires et permanents à l'aide d'indicateurs et de systèmes d'identification distincts.

## Chapitre 4 – Architecture du système de reconnaissance

Le système de reconnaissance automatique présenté dans ce mémoire cible un large éventail de perturbations électrotechniques. Elles ont pour origine les différents types de défauts, les enclenchements de transformateurs et de départs, les connexions de batteries de condensateurs de compensation, les raccordements de charges... Pour chacune d'elles, de multiples configurations du réseau sont considérées.

Trois positions de points de mesure peuvent être distinguées (Figure 2-5) : le jeu de barres des postes de source, le primaire des postes de livraison HTA/BT et le milieu d'un départ HTA (mesure en réseau). Au cours de cette thèse, seules les deux premières positions ont été traitées. Si l'analyse de formes d'onde mesurées en milieu de réseau n'a pas été envisagée, les méthodes proposées dans ce manuscrit pour les deux premières catégories de points de mesure peuvent toutefois être facilement adaptées à cette situation.

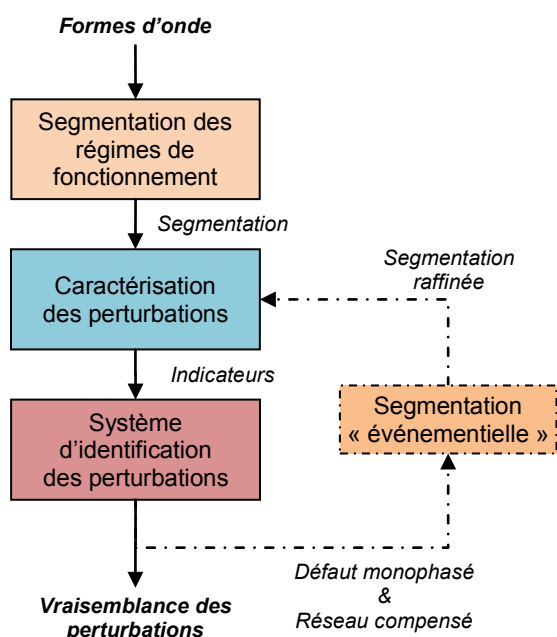
Pour répondre aux problématiques de fiabilité et d'efficacité inhérentes aux systèmes automatiques, le système développé utilise une structure de reconnaissance originale organisée en deux niveaux.

- ✓ Le premier réalise une décomposition et une analyse « large spectre » des perturbations. Les informations déterminées par ce niveau suffisent à caractériser et identifier la quasi-totalité des perturbations recherchées.
- ✓ Le second niveau est uniquement utilisé pour les réseaux compensés dans le cas particulier où le niveau précédent oriente la reconnaissance vers la classe « défaut monophasé ». Il utilise des méthodes adaptées aux spécificités de ce type de perturbations (proximité des événements, absence de régimes permanents entre deux transitoires successifs...).

Les deux niveaux du système se composent chacun de trois parties distinctes réalisées de manière séquentielle. Elles assurent respectivement la segmentation des formes d'onde, la caractérisation des régimes de fonctionnement et l'identification des perturbations. Les méthodes employées au cours de chaque partie dépendent du niveau du système considéré.

Les deux niveaux diffèrent uniquement par la méthode de segmentation utilisée. Leurs étapes de caractérisation et d'identification sont identiques dans les deux cas. La Figure 4-1 illustre la mise en œuvre de ces deux niveaux.

Les enjeux des différentes parties du système de reconnaissance des perturbations électrotechniques et les réponses qui y sont apportées sont introduites dans la suite du chapitre.



**Figure 4-1 – Architecture du système de reconnaissance des perturbations**

### **Segmentation « large spectre » des formes d'onde**

La segmentation des formes d'onde mesurées sur un réseau électrique est essentielle au procédé de reconnaissance, car elle supporte les étapes suivantes de caractérisation et d'identification. Pour que la décomposition obtenue soit robuste et précise, la méthode proposée considère plusieurs problématiques couramment négligées, comme les variations de régimes harmoniques et la proximité des phases des perturbations.

La méthode de segmentation à « large spectre » présentée dans ce mémoire décompose les régimes de fonctionnement du réseau à partir des formes d'onde des tensions et des courants. Elle procède en plusieurs étapes. Elle s'appuie sur des méthodes de filtrage peu sensibles au bruit et aux harmoniques pour isoler les régimes transitoires des formes d'onde. Les signaux filtrés sont ensuite analysés par un algorithme de détection adaptatif dont les seuils de décision évoluent en fonction du contexte de la perturbation. Enfin, les décompositions obtenues subissent un post-traitement qui corrige l'erreur de segmentation et fusionne les segmentations en une unique décomposition.

Ces étapes successives assurent à la segmentation finale une faible sensibilité aux perturbations harmoniques permanentes et au bruit, un taux d'erreurs de détection réduit et une grande précision. Ces propriétés simplifient l'extraction des informations des différents intervalles des perturbations et facilitent leur interprétation lors des étapes de caractérisation et d'identification. Elles contribuent ainsi à améliorer la fiabilité du système de reconnaissance dans son ensemble.

Le procédé de décomposition des perturbations développé peut aussi faire office de système de détection des perturbations électrotechniques en temps-réel. Sa capacité à déceler tous les types de transitoires peut être utilisée pour signaler la présence de perturbations sur le réseau. Cette application est directe puisque tous les événements recherchés sont caractérisés par au moins un

régime transitoire. Sa fiabilité, caractérisée par un faible taux de fausses alarmes, convient parfaitement à un système détectant en temps-réel les perturbations.

### **Caractérisation des régimes de fonctionnement**

L'étape de caractérisation détermine l'ensemble des attributs des perturbations utilisés lors de l'étape suivante pour leur identification. Les indicateurs proposés sont définis de manière à ce qu'ils soient peu sensibles à la précision de la segmentation ainsi qu'aux perturbations permanentes de type harmoniques et bruit. Leur robustesse est ainsi renforcée.

Les indicateurs de reconnaissance présentés dans ce manuscrit réalisent l'analyse différenciée des régimes de fonctionnement du réseau, c'est à dire que deux jeux d'indicateurs distincts sont utilisés pour décrire les régimes transitoires et les régimes permanents. Ils sont choisis de sorte à exploiter au mieux les particularités des perturbations.

- ✓ Les indicateurs employés pour décrire les régimes permanents des perturbations sont simples et peu coûteux. Ils sont basés sur les valeurs et variations des moyennes de grandeurs électrotechniques entre des segments permanents identifiés.
- ✓ Les indicateurs utilisés pour caractériser les régimes transitoires renseignent sur la dynamique de la perturbation. Ils exploitent soit les variations locales de grandeurs observées au cours du transitoire, soit les paramètres d'un comportement que l'on a identifié (comportement exponentiel, sinusoïdal amorti...). Le calcul de ce second type d'indicateurs est algorithmiquement plus complexe. Leur coût est donc plus important.

### **Identification des perturbations**

Dans ce manuscrit, deux méthodes d'identification sont étudiées. Elles s'appuient sur l'analyse différenciée des régimes de fonctionnement des perturbations et assurent la classification robuste des événements détectés par l'étape de segmentation. Le système de reconnaissance décrit dans ce mémoire détermine le type de la perturbation observée ainsi que la direction de sa source par rapport au point de mesure (amont ou aval). Des informations pouvant être exploitées à des fins de localisation sont aussi calculées.

Les deux types de systèmes de décision testés pour analyser ces indicateurs et en déduire l'identité de la perturbation détectée sont :

- ✓ un système expert bâti sur un ensemble de règles exprimées en logique floue,
- ✓ un système de reconnaissance à apprentissage supervisé de type « machine à vecteurs de support » (SVM).

Ces deux systèmes déterminent non seulement la classe d'appartenance de la perturbation détectée, mais ils fournissent également une information sur la pertinence du résultat de la reconnaissance.

### **Traitement des défauts monophasés sur les réseaux à neutre compensé**

Les trois étapes précédentes correspondent au premier niveau du système de reconnaissance. Elles réalisent une analyse « large spectre » des formes d'onde. Si ce niveau suffit à détecter et identifier la grande majorité des perturbations recherchées, il est confronté à ses limites dans le cas particulier des défauts monophasés survenant sur les réseaux de distribution à neutre compensé. Comme présenté au paragraphe 2.3, ces perturbations ne présentent pas nécessairement de régimes permanents entre deux régimes transitoires successifs. Cette particularité rend partiellement caduque la méthode de segmentation basée sur la distinction des régimes transitoires et permanents, ainsi que la caractérisation et l'identification des perturbations déterminées à partir de cette décomposition.

Afin de pallier les déficiences du premier niveau d'identification, un second niveau de reconnaissance poursuit son analyse. Il est utilisé lorsque le premier niveau identifie la présence d'un défaut monophasé sur un réseau compensé. Les formes d'onde subissent alors un nouveau cycle de segmentation, caractérisation et identification fondé sur des méthodes adaptées à ce type d'événements particulier. Par contre, si aucun défaut monophasé n'est détecté au cours du premier niveau, le résultat de la segmentation et de l'identification de la perturbation est conservé. Pour un réseau impédant, la structure d'analyse classique en un seul niveau à trois étapes (segmentation, caractérisation et identification) est également conservée car l'utilisation du second niveau ne présente aucun intérêt.

Le second niveau de la structure de reconnaissance est composé de trois étapes. Lors de l'étape de segmentation, la décomposition précédemment déterminée est affinée à l'aide d'un second procédé de segmentation propre aux défauts monophasés sur réseaux compensés. Cette seconde méthode est à ce titre qualifiée d'« événementielle ». Les étapes de caractérisation et d'identification traitant cette nouvelle décomposition sont identiques à celles du premier niveau.

### **Cas d'utilisation du système**

Le système de reconnaissance automatique présenté dans ce mémoire est destiné à être utilisé dans différentes situations. Son application première consiste à analyser *a posteriori* des enregistrements des formes d'onde de perturbations réalisés par des appareils de qualimétrie classiques. La durée de ces enregistrements est limitée (quelques secondes maximum) et leur fréquence d'échantillonnage variable (1,6 à 12,8 kHz). Il a par la suite été étendu à l'analyse d'enregistrements continus de formes d'onde. Les fichiers de données alors analysés correspondent à des périodes d'observations de plusieurs heures. Il est actuellement adapté à l'analyse en temps-réel des perturbations mesurées par les appareils de qualimétrie.

L'ensemble des travaux réalisés au cours de cette thèse est fondé sur la volonté d'*analyser en quasi-temps-réel* les perturbations causées par les événements électrotechniques et observées au niveau

des réseaux de distribution HTA. Cet objectif a motivé la recherche de méthodes de segmentation, d'indicateurs de reconnaissance et d'une architecture d'identification à la fois performants et algorithmiquement simples.

### **Fonctionnalités et modalités d'applications**

Les formes d'onde que le procédé de reconnaissance développé est amené à analyser sont acquises par des types d'appareils de qualimétrie et des capteurs différents. Les données traitées sont de fréquences d'échantillonnage, de résolution et de qualité diverses. Dans certains cas, des erreurs surviennent également dans les branchements (inversions de phases) ou dans le calibrage des capteurs (présence d'offset).

Afin de limiter leur impact, le système développé réalise, avant de lancer l'identification, un premier diagnostic des données traitées. À partir du comportement des formes d'onde en début d'enregistrement, il identifie et corrige plusieurs problèmes liés à la mesure dont les deux problèmes précités. Il requiert toutefois que les formes d'onde analysées soient en régime permanent sans défaut sur la totalité du premier intervalle de temps analysé.

Les données analysées par le procédé de reconnaissance sont soit mesurées à des fréquences d'échantillonnage variables synchronisées par l'appareil de qualimétrie avec la fréquence du fondamental, soit observées à une fréquence constante. Dans le premier cas, on choisit de rééchantillonner les données avec un pas fixe proche des fréquences d'échantillonnage du signal avant de lancer la reconnaissance. Ce rééchantillonnage par interpolation linéaire dégrade peu la qualité du signal mais réduit fortement la complexité algorithmique des méthodes qui sont appliquées par la suite. De plus, la perte de la notion de synchronisation est sans conséquence à ce niveau car elle est intégrée à l'ensemble des méthodes et traitements du système de reconnaissance faisant appel à la fréquence fondamentale.

Les deux catégories de méthodes de segmentation développées pour identifier les phases significatives des formes d'onde, c'est-à-dire le procédé de segmentation des régimes de fonctionnement et la méthode de segmentation événementielle, sont présentées dans la Partie 2 de ce manuscrit.

Les principaux indicateurs utilisés pour caractériser les perturbations sont exposés dans la Partie 3. Leur mise en œuvre et leur robustesse aux erreurs de segmentation y sont également développées.

Les systèmes de décision développés et les démarches utilisées pour leur mise au point sont présentés dans la Partie 4. L'ensemble du système de reconnaissance y est ensuite évalué et validé à partir d'enregistrements réels.

## Partie 2

### Segmentation adaptative des formes d’onde

#### Sommaire :

<b>CHAPITRE 5 – SEGMENTATION DES PERTURBATIONS.....</b>	<b>49</b>
<b>CHAPITRE 6 – SEGMENTATION DES REGIMES DE FONCTIONNEMENT .....</b>	<b>51</b>
6.1. PRINCIPE DE LA METHODE DE SEGMENTATION ADAPTATIVE .....	51
6.2. OBJECTIFS DU PROCEDE DE SEGMENTATION .....	52
6.3. ARCHITECTURE DU PROCEDE DE SEGMENTATION ADAPTATIF .....	55
<b>CHAPITRE 7 – PRE-TRAITEMENT DES FORMES D’ONDE .....</b>	<b>57</b>
7.1. CRITERES DE SELECTION DES INDICES DE SEGMENTATION .....	58
7.2. ESTIMATION DE LA FREQUENCE FONDAMENTALE .....	59
7.2.1. <i>Intérêt de l’estimation de la fréquence fondamentale.....</i>	<i>59</i>
7.2.2. <i>Estimation de la fréquence à partir des passages par zéro .....</i>	<i>60</i>
7.2.3. <i>Gestion des informations de fréquence.....</i>	<i>61</i>
7.3. METHODES DE FILTRAGE DES FORMES D’ONDE .....	62
7.3.1. <i>Filtrage anti-harmoniques (AHF) .....</i>	<i>62</i>
7.3.2. <i>Filtrage de Kalman.....</i>	<i>69</i>
7.4. CALCUL DE L’ENERGIE DU SIGNAL FILTRE .....	75
7.5. ETUDE COMPARATIVE DES INDICES DE SEGMENTATION .....	76
<b>CHAPITRE 8 – DETECTION DES TRANSITOIRES DES PERTURBATIONS .....</b>	<b>82</b>
8.1. CRITERES D’EVALUATION DE LA DETECTION .....	82
8.2. LIMITES DU SEUILLAGE STATIQUE.....	83
8.3. ALGORITHME DE DETECTION ADAPTATIF.....	85
8.3.1. <i>Adaptation des seuils de détection.....</i>	<i>85</i>
8.3.2. <i>Détection des transitoires .....</i>	<i>87</i>
<b>CHAPITRE 9 – POST-TRAITEMENT DE LA DECOMPOSITION .....</b>	<b>89</b>
9.1. COMPENSATION DU RETARD DE SEGMENTATION.....	89
9.1.1. <i>Origine du retard de segmentation .....</i>	<i>89</i>
9.1.2. <i>Intérêt de la compensation du retard de la décomposition .....</i>	<i>89</i>
9.1.3. <i>Méthodes de compensation du retard .....</i>	<i>91</i>
9.2. FUSION DES SEGMENTATIONS .....	96



<b>CHAPITRE 10 – SEGMENTATION « EVENEMENTIELLE » .....</b>	<b>99</b>
10.1. PRINCIPE DE LA SEGMENTATION EVENEMENTIELLE.....	99
10.2. OBJECTIFS DU PROCEDE DE SEGMENTATION .....	100
10.3. ARCHITECTURE DU PROCEDE DE SEGMENTATION EVENEMENTIELLE.....	102
10.4. PRE-TRAITEMENT DES FORMES D’ONDE .....	103
10.4.1. <i>Calcul de la valeur efficace de la tension homopolaire</i> .....	103
10.4.2. <i>Calcul du gradient</i> .....	105
10.5. PROCEDE DE DECOMPOSITION.....	106
10.6. POST-TRAITEMENT DES SEGMENTATIONS .....	111
<b>CHAPITRE 11 – PERFORMANCES DU PROCEDE DE SEGMENTATION .....</b>	<b>114</b>
11.1. DESCRIPTION DE LA BASE D’EVALUATION.....	114
11.2. PERFORMANCES DE LA SEGMENTATION ADAPTATIVE.....	116
11.3. PERFORMANCES DE LA SEGMENTATION EVENEMENTIELLE.....	119

## Chapitre 5 – Segmentation des perturbations

Dans de nombreux domaines d'applications, des systèmes de segmentation sont employés au sein de systèmes de reconnaissance [GRA06, PEL98, CHA04]. Ils décomposent les phénomènes mesurés en segments significatifs afin de simplifier la compréhension des événements. Les informations temporelles obtenues sont utilisées pour extraire des renseignements propres à chacune des phases caractéristiques de la perturbation. Elles sont ensuite analysées à des fins d'identification.

L'analyse automatique des perturbations observées sur les réseaux électriques fait apparaître une problématique similaire. Pour reconnaître les événements responsables, il convient d'identifier au préalable les intervalles temporels durant lesquels les perturbations apparaissent, persistent, évoluent et disparaissent.

Pour faciliter le travail de reconnaissance, la décomposition des formes d'onde doit être fiable, c'est-à-dire que le procédé de segmentation doit identifier l'ensemble des segments caractéristiques des perturbations et présenter un faible nombre de décompositions erronées.

Si la bonne détection des phases caractéristiques des perturbations est essentielle à leur analyse, elle ne suffit pas à garantir les performances du processus d'identification. La précision de la décomposition doit également être considérée. Chaque phase d'une perturbation est porteuse d'informations qui lui sont propres et qu'il convient d'extraire au mieux. Si les bornes de leurs intervalles temporels sont mal évaluées, les informations extraites par les indicateurs risquent d'être erronées. Ces indicateurs se comportent différemment en fonction du retard de segmentation. Leur plage de validité dépend, entre autres, du type de la perturbation détectée, de sa durée, de sa gamme de fréquence ou de la grandeur analysée par l'indicateur [CAU11a]. Leur sensibilité vis-à-vis de la précision de la segmentation introduit donc des contraintes supplémentaires sur sa qualité. Son impact sur un panel restreint d'indicateurs est étudié au Chapitre 15. Les contraintes identifiées sont utilisées pour définir les objectifs de la méthode de segmentation décrite dans cette partie.

Dans ce manuscrit, deux méthodes de segmentation complémentaires sont proposées afin de remplir les objectifs relatifs à la qualité de détection et à la précision de la décomposition des régimes de fonctionnement des perturbations.

- **Procédé de segmentation adaptatif des régimes de fonctionnement**

La 1<sup>re</sup> méthode de segmentation décompose les formes d'onde des perturbations en fonction de leurs régimes de fonctionnement, c'est-à-dire qu'elle distingue leurs régimes transitoires de leurs régimes

permanents. Elle s'adapte aux régimes harmoniques des signaux ainsi qu'à la présence de régimes transitoires proches pour améliorer sa capacité de détection et la précision de la décomposition.

Cette méthode effectue une « analyse large spectre » des formes d'onde. Elle décompose efficacement les perturbations pouvant être vues comme une succession de régimes permanents et transitoires. Elle est par conséquent applicable à la quasi-totalité des événements survenant sur les réseaux de distribution : les perturbations causées par les défauts, les connexions de batteries de condensateurs de compensation, les enclenchements de transformateurs ou de départs, les connexions et déconnexions de charges...

- **Procédé de segmentation « événementielle »**

Le principe d'une segmentation des formes d'onde reposant sur la distinction des régimes de fonctionnement ne peut être étendu à certains défauts monophasés affectant les réseaux à neutre compensé. En effet, certains défauts auto-extincteurs ou réamorçants se présentent comme une suite de régimes transitoires entre lesquels un régime de fonctionnement permanent n'est pas nécessairement atteint. Dans ces conditions, la décomposition « large spectre » déterminée par le procédé de segmentation adaptatif n'est plus suffisante et doit être affinée. C'est le rôle de la méthode de segmentation « événementielle ».

Cette seconde méthode possède un champ d'application plus restreint. Elle est limitée à une seule catégorie d'événements, les *défauts monophasés* affectant les réseaux à moyenne tension dont le *neutre est compensé*. Elle vient en complément de la méthode précédente lorsque ce type de perturbations affecte le réseau.

Confrontée à des défauts monophasés, cette méthode part de la segmentation fournie par la méthode précédente pour identifier les intervalles temporels correspondant à leurs apparitions et extinctions. En présence d'autres catégories de transitoires, le procédé de segmentation « événementielle » n'est pas utilisé.

Dans l'ensemble de cette partie, les principes, les objectifs, la mise en œuvre et les performances de ces deux méthodes de segmentation sont exposés. La structure de l'ensemble du procédé de segmentation développé y est également détaillée.

**Remarque 1 : Application à la détection des perturbations**

Le cadre d'application du procédé de segmentation développé peut être étendu à la détection des perturbations. Il est utilisable comme système d'analyse en temps-réel pour signaler la présence de perturbations dans les formes d'onde. Cette extension est directe car tout événement électrotechnique affectant le réseau est signalé par au moins un transitoire : détecter un transitoire revient à signaler la présence d'un événement perturbateur sur le réseau.

## Chapitre 6 – Segmentation des régimes de fonctionnement

### 6.1. Principe de la méthode de segmentation adaptative

Le procédé de segmentation adaptatif présenté dans ce mémoire analyse les formes d'onde pour séparer les régimes de fonctionnement du réseau. Son principal objectif est l'identification des intervalles temporels au cours desquels les perturbations apparaissent, persistent, évoluent et disparaissent. Pour en simplifier l'analyse, la méthode de segmentation développée distingue uniquement deux catégories de segments significatifs :

- **Les segments dits de « régime permanent »**

Ces segments correspondent aux intervalles temporels durant lesquels les grandeurs électrotechniques du réseau restent stationnaires. Ils ne renseignent pas directement sur l'état du réseau. Du moment que le comportement des formes d'onde est stable, ces segments caractérisent indifféremment les états de fonctionnement normaux et les états perturbés du réseau. Il revient à l'étape d'identification de réaliser cette distinction.

- **Les segments dits de « régime transitoire »**

Ces segments correspondent aux intervalles temporels sur lesquels une variation brusque et importante des grandeurs électrotechniques est observée. Ils caractérisent indifféremment les phases d'apparition, d'évolution et de disparition des perturbations affectant les réseaux électriques. Leur détection signale la présence d'un évènement ou d'un changement d'état du réseau.

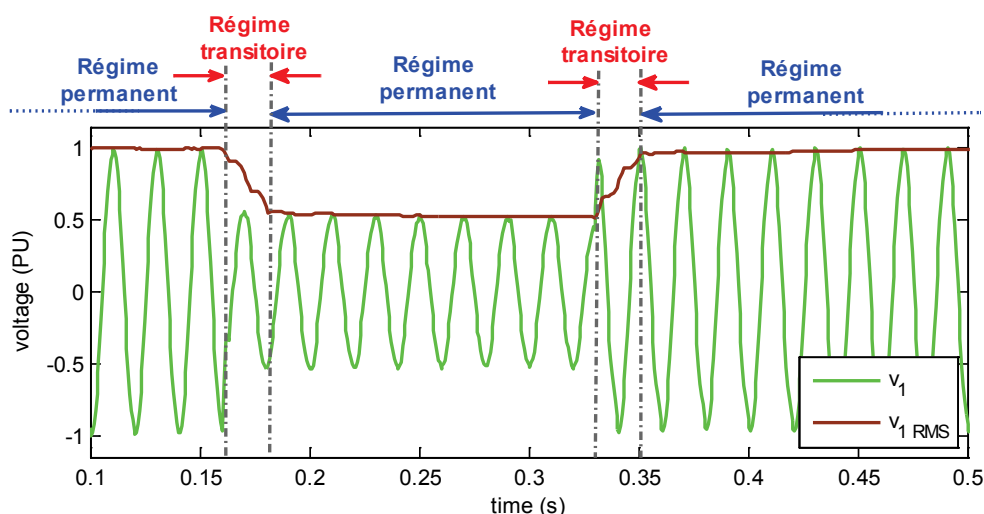


Figure 6-1 – Décomposition d'un creux de tension selon ses régimes de fonctionnement permanents et transitoires

La Figure 6-1 présente un exemple de décomposition en régimes transitoires et permanents. Le creux de tension représenté est observé sur la tension simple d'une des phases en défaut au cours de la perturbation causée par un défaut biphasé isolé sur un réseau HTA à neutre impédant.

On notera que cette méthode ne permet pas distinguer deux régimes transitoires successifs. Elle découpe alternativement les formes d'onde en leurs régimes transitoires et permanents.

### 6.2. Objectifs du procédé de segmentation

La reconnaissance des perturbations repose sur le calcul et l'interprétation d'un ensemble d'indicateurs. Ces indicateurs renseignent sur le comportement des perturbations au cours des intervalles temporels identifiés par le procédé de segmentation. La qualité des informations qu'ils fournissent dépend directement de celle de la décomposition des formes d'onde. Cette dépendance est particulièrement marquée lorsque les informations contenues dans les transitoires rapides des perturbations sont recherchées [CAU11a].

Afin d'assurer une analyse automatique et fiable des événements observés sur le réseau, le procédé de segmentation doit vérifier plusieurs caractéristiques. Il doit identifier efficacement l'ensemble des transitoires affectant les formes d'onde, car ces intervalles temporels sont révélateurs des changements d'état du système. Manquer un transitoire ou détecter des transitoires supplémentaires peut dégrader fortement la compréhension de l'évènement à l'origine de la perturbation. En plus des performances propres à la détection des transitoires, le procédé de segmentation est soumis à des contraintes de précision temporelle. L'estimation des instants correspondant au début de chaque phase des perturbations doit être suffisamment précise pour que les informations contenues dans les différents segments soient extraites de manière fiable.

#### Expression des objectifs du procédé de segmentation

Ces contraintes qualitatives se traduisent en plusieurs objectifs quantitatifs pour le procédé de segmentation. Ils sont définis par les grandeurs suivantes :

- Le *taux de détection* des transitoires illustre la capacité du procédé à détecter les différents changements d'état du réseau.

$$\tau_{\text{detection}} = \frac{\text{nombre de transitoires détectés}}{\text{nombre total de transitoires}} \quad (6-1)$$

- Le *taux de sur-segmentation* représente la stabilité du procédé de segmentation. Il indique le taux de transitoires détectés de manière erronée, c'est à dire la proportion de transitoires détectés en l'absence de variations significatives de l'état du réseau électrique.

$$\tau_{\text{erreur}} = \frac{\text{nombre de fausses détections}}{\text{nombre total de transitoires}} \quad (6-2)$$

- Le *retard de segmentation* correspond à la valeur moyenne des intervalles temporels séparant les instants d'apparition des transitoires de leurs instants de détection par le procédé de segmentation. En fonction de la méthode utilisée et de la perturbation analysée, il prend des valeurs tant positives que négatives. Nous avons choisi la dénomination de « retard » pour désigner l'erreur temporelle sur la segmentation des formes d'onde, car un système de détection classique présente toujours un certain délai entre l'instant d'apparition de l'évènement et sa détection. Seule une compensation *a-posteriori* de la détection permet de compenser ce retard et ainsi d'améliorer la précision de la décomposition des formes d'onde.

$$m_r = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{retard}_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{\text{detection}_i} - t_{\text{apparition}_i} \quad (6-3)$$

Où :  $N$  = nombre total de transitoires

- L'*écart-type de la segmentation* renseigne sur la dispersion des instants de détection des transitoires des perturbations déterminés par le procédé de décomposition par rapport à leurs instants d'apparition réels. Plus celui-ci est faible, plus la précision de la segmentation des perturbations augmente.

$$e_r = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\text{retard}_i - m_r)^2} \quad (6-4)$$

- Le *pourcentage de retards inférieurs à 2,5 ms* traduit la concentration des segmentations autour des instants d'apparition des perturbations. Cette valeur de 2,5 ms est choisie car elle correspond à la valeur de la variance autorisée sur le retard de segmentation pour la caractérisation et la reconnaissance des perturbations causées par des enclenchements de départs (Chapitre 15). Cet indicateur nous informe du taux de segmentations utilisables pour l'identification fiable de telles perturbations.

$$\tau_{usable} = \frac{1}{N} \sum (|\text{retard}_i| < 2,5\text{ms}) \quad \text{Où : } |\text{retard}_i| < 2,5\text{ms} = \begin{cases} 1 & \text{si } |\text{retard}_i| < 2,5\text{ms} \\ 0 & \text{si } |\text{retard}_i| \geq 2,5\text{ms} \end{cases} \quad (6-5)$$

- Le *pourcentage de retards supérieurs à une période  $T_0$  (20 ms)* quantifie la dispersion des instants de détection des transitoires des perturbations. Pour l'analyse de la grande majorité des perturbations, une erreur sur l'instant d'apparition supérieure à une période dégrade très fortement la qualité des informations extraites pour leur caractérisation. Le processus de reconnaissance est alors compromis quel que soit le type de la perturbation considéré. Ce taux renseigne sur la proportion de segmentations entraînant des fausses identifications.

$$\tau_{false} = \frac{1}{N} \sum (|\text{retard}_i| > 20\text{ms}) \quad \text{Où : } |\text{retard}_i| > 20\text{ms} = \begin{cases} 1 & \text{si } |\text{retard}_i| > 20\text{ms} \\ 0 & \text{si } |\text{retard}_i| \leq 20\text{ms} \end{cases} \quad (6-6)$$

Les deux premières grandeurs ( $\tau_{\text{détection}}$  et  $\tau_{\text{erreur}}$ ) mesurent la fiabilité de la détection des transitoires des perturbations tandis que les quatre suivantes ( $m_r$ ,  $e_r$ ,  $\tau_{usable}$  et  $\tau_{false}$ ) renseignent sur la précision avec laquelle les intervalles temporels des phases significatives des perturbations sont estimés.

Ces six critères sont retenus pour évaluer les performances des différentes associations de méthodes de pré-traitement et de correction du retard de décomposition pouvant intervenir au sein de l'algorithme de segmentation développé. La comparaison de ces variantes permet d'identifier l'impact de leurs différentes composantes.

### **Quantification des objectifs du procédé de segmentation**

L'influence des taux de détection ( $\tau_{détection}$ ) et de sur-segmentation ( $\tau_{erreur}$ ) sur la reconnaissance est difficile à quantifier car tous les transitoires d'une perturbation n'ont pas la même influence sur le procédé d'identification. En effet, détecter un transitoire supplémentaire peut n'avoir aucune incidence sur le processus d'identification comme il peut le fausser complètement.

Pour que la reconnaissance des perturbations soit peu impactée par les détections erronées et omises, le procédé de segmentation doit décomposer les signaux avec un taux de détection le plus élevé et un taux de sur-segmentation le plus faible possible. Dans le cadre de notre application, nous nous sommes fixés comme objectifs un taux de détection des transitoires supérieur à 99% ( $\tau_{détection} > 99\%$ ) et un taux de sur-segmentation inférieur à 5% ( $\tau_{erreur} < 5\%$ ) pour l'ensemble des perturbations recherchées.

Les grandeurs quantifiant la précision de la segmentation ( $m_r$  et  $e_r$ ) sont, par contre, soumises à des contraintes précises. Ces contraintes sont essentiellement propres au type, à la durée ou au contenu fréquentiel des transitoires des perturbations. Elles découlent des intervalles de validité des indicateurs utilisés pour la reconnaissance des perturbations. Leur analyse fixe les conditions devant être vérifiées par le procédé de segmentation pour chaque type de perturbations. Par exemple, pour les enclenchements de transformateurs et pour les défauts « classiques », un retard quasi-nul et un écart-type inférieur à 2,5 ms sont requis. Pour les enclenchements de batteries de condensateurs, des conditions plus strictes doivent être vérifiées puisqu'un écart-type inférieur à 0,25 ms est nécessaire au calcul de l'ensemble des indicateurs. Cette problématique est évoquée au Chapitre 15 de ce manuscrit.

Les contraintes sur les taux  $\tau_{usable}$  et  $\tau_{false}$ , représentant respectivement la proportion de décompositions utilisables pour la reconnaissance des perturbations et celle de décompositions inexploitable, sont moins spécifiques. Pour garantir un certain niveau de performances pour la reconnaissance, on se fixe comme objectifs  $\tau_{usable} > 97,5\%$  et  $\tau_{false} < 0,5\%$  pour l'ensemble des types de perturbations quel que soit le régime de neutre du réseau. Ces objectifs permettent d'évaluer la méthode lorsqu'elle est confrontée à des défauts et des enclenchements de départs. Ils sont par contre très insuffisants pour caractériser sa fiabilité en présence d'enclenchements de batteries de condensateurs, car ces événements requièrent une précision très supérieure (Chapitre 15).

Les valeurs de ces différentes grandeurs sont utilisées au Chapitre 11 pour évaluer les performances des variantes du procédé de segmentation adaptatif développé pour l'analyse des perturbations.

L'impact de la méthode de pré-traitement et de sa mise en œuvre ainsi que de celui de la méthode de compensation du retard sont examinés. La vérification de ces objectifs par les variantes testées y est réalisée sur une large base d'évènements.

Dans le document [CAU10b], un plus large éventail de pré-traitements et de méthodes de correction des segmentations est comparé.

### 6.3. Architecture du procédé de segmentation adaptatif

Le procédé de segmentation adaptatif présenté dans ce mémoire a été développé pour répondre aux objectifs de fiabilité et de précision imposés à la décomposition des perturbations. Il exploite les formes d'onde des trois tensions simples et des trois courants de ligne mesurés sur le réseau. Sa structure, présentée à la Figure 6-2, comporte trois étapes principales.

#### 1. Pré-traitement des formes d'onde

L'étape de *pré-traitement* traite les formes d'onde mesurées sur le réseau afin d'extraire les transitoires des perturbations. Les signaux obtenus sont désignés dans ce manuscrit par le terme d'« *indices de segmentation* ». Ils sont utilisés par l'algorithme de détection pour identifier les transitoires apparaissant en présence d'évènements électrotechniques.

Les indices de segmentation sont choisis selon plusieurs critères. Leur capacité à extraire les transitoires, leur résolution et leur stabilité en régime permanent sont principalement considérées.

Un large éventail de méthodes de filtrage peut être utilisé pour calculer ces indices [CAU10b]. Dans ce manuscrit, on se limitera à la présentation et la mise en œuvre des méthodes de filtrage de Kalman et de filtrage anti-harmoniques. Ces deux méthodes sont détaillées au Chapitre 7.

#### 2. Détection des transitoires

L'étape de *détection des transitoires* distingue les régimes de fonctionnement transitoire du réseau qui apparaissent en présence d'une perturbation. Elle exploite de manière indépendante les indices de segmentation déterminés pour chaque tension et courant mesurés. Conçue pour s'adapter aux variations des régimes harmoniques des formes d'onde, elle assure une grande robustesse au processus de détection. À l'issue de cette étape, chaque forme d'onde de tension et de courant est caractérisée par une décomposition en régimes de fonctionnement transitoires et permanents qui lui est propre. Cette étape est présentée au Chapitre 8.

#### 3. Post-traitement de la décomposition

L'étape de *post-traitement de la décomposition* réalise deux tâches essentielles pour l'analyse des perturbations. Dans un premier temps, elle compense le retard de détection associé à chaque segment et améliore la localisation des instants d'apparition des transitoires. Dans un



second temps, elle fusionne les décompositions déterminées pour les trois tensions et les trois courants en une unique segmentation. La décomposition obtenue à l'issue de ce rassemblement est commune à l'ensemble des formes d'onde analysées. Ce second module est essentiel pour analyser les perturbations mesurées sur le réseau électrique de manière unifiée. Les deux modules de post-traitement de la segmentation sont détaillés au Chapitre 9.

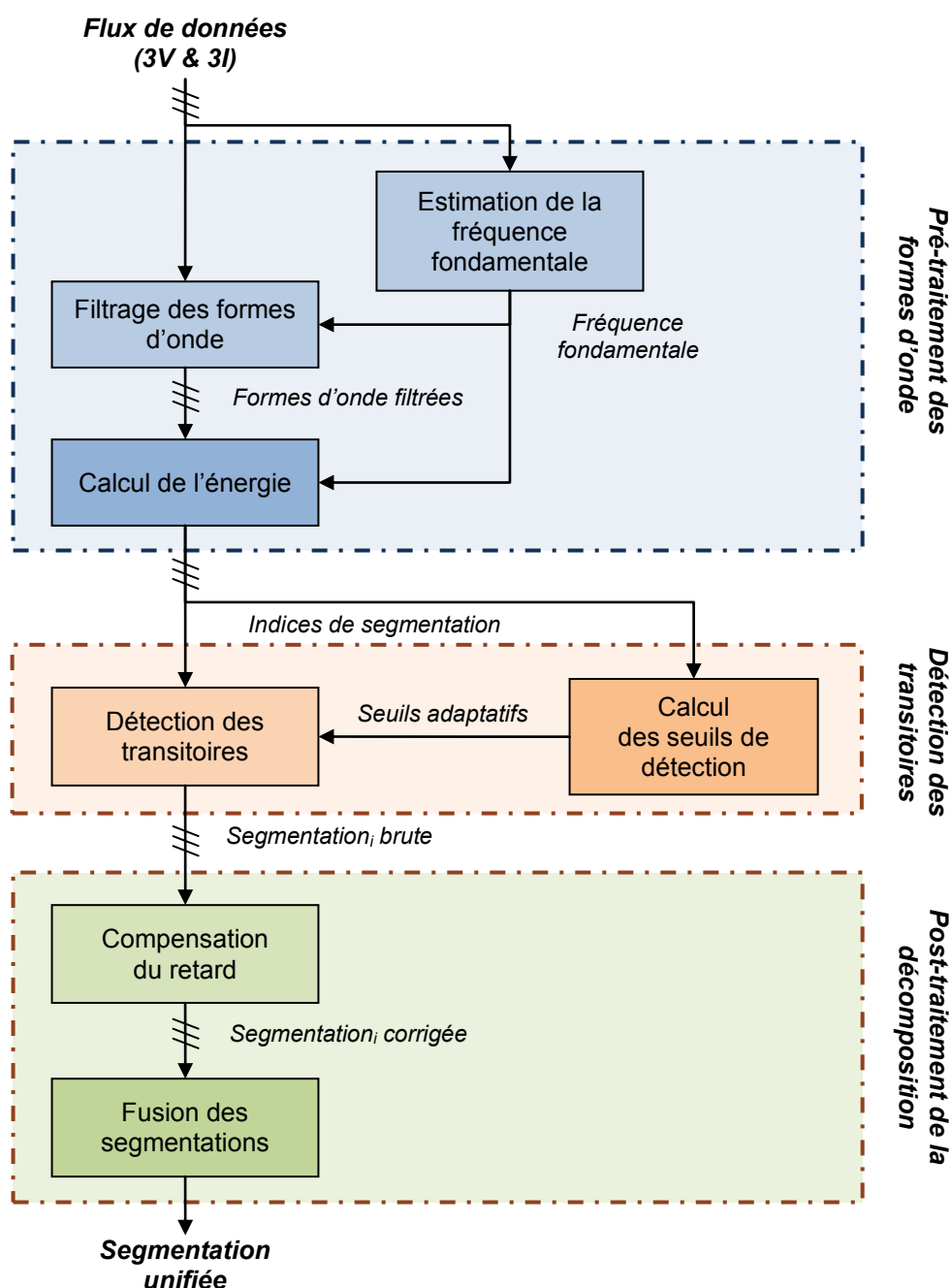


Figure 6-2 – Architecture du procédé d'identification des régimes de fonctionnement

## Chapitre 7 – Pré-traitement des formes d'onde

Au cours de l'étape de pré-traitement des formes d'onde, les indices de segmentation sont calculés pour chaque tension et courant du système triphasé. Ces indices sont utilisés par l'algorithme de décomposition afin d'extraire les régimes transitoires des formes d'onde. Pour faciliter ce processus, ils doivent présenter des variations significatives lors des phases d'apparition, d'évolution et de disparition des perturbations. Le calcul de ces indices est réalisé par trois modules distincts :

### ✓ Estimation de la fréquence fondamentale

Sauf événements exceptionnels, la fréquence fondamentale du réseau est une grandeur stable. Sa valeur se trouve dans une étroite plage de fréquences, globalement comprise entre 49,5 Hz et 50,5 Hz. Son estimation est requise pour les étapes de filtrage et de calcul de l'énergie. Les méthodes de filtrage de Kalman et anti-harmoniques utilisent toutes deux la fréquence fondamentale comme référence. Le calcul de l'énergie du signal filtré est également impacté puisque la taille de ses fenêtres d'intégration est référencée à partir de cette fréquence.

Dans la grande majorité des cas, cette fréquence n'est pas affectée par la présence de perturbations. La considérer constante sur l'ensemble d'un enregistrement constitue donc une approximation raisonnable. Toutefois, afin d'étendre le domaine d'applications du procédé de segmentation aux applications temps-réels et à l'analyse des situations de découplage, on choisit de l'évaluer en continu. Cette évaluation améliore également la sensibilité des indices de segmentation aux perturbations transitoires et leur robustesse aux perturbations de régime permanent.

### ✓ Filtrage des formes d'onde

La méthode de filtrage des formes d'onde est sélectionnée afin de maximiser les variations du signal filtré en présence de transitoires. Dans ce mémoire, seules deux techniques de filtrage sont étudiées, le filtrage anti-harmoniques et le filtrage de Kalman associé à un modèle harmonique. Dans [CAU10b], ces deux techniques ont été identifiées comme présentant le meilleur compromis entre capacité de détection, temps de réponse et sensibilité aux perturbations permanentes. Toutes deux requièrent un suivi de la fréquence fondamentale pour fonctionner de manière optimale.

### ✓ Calcul de l'énergie des signaux filtrés

Quelle que soit la méthode de filtrage, des perturbations de type bruit et harmoniques persistent dans le signal en régime permanent. Il convient de lisser ces perturbations afin de limiter leur impact sur la détection. Pour ce faire, un procédé équivalent à un filtrage de type passe-bas est appliqué aux formes d'onde. Les seuils de détection peuvent ainsi être abaissés sans que le taux de fausses

détections augmente.

Le procédé choisi calcule l'énergie du signal filtré. Cette grandeur est sélectionnée car elle représente une réalité physique. Pour les filtres anti-harmoniques et de Kalman, elle correspond à l'énergie des écarts de la forme d'onde par rapport au modèle harmonique du signal. Son effet passe-bas peut être réglé en influant sur la dimension de la fenêtre glissante employée pour l'intégration du signal. La taille minimale de cette fenêtre est conditionnée par la méthode de filtrage employée pour extraire les transitoires des formes d'onde [WAN04].

### Remarque 2 : Méthodes de pré-traitement alternatives

D'autres méthodes de pré-traitement ont également été étudiées au cours de cette thèse. Elles se fondent essentiellement sur les méthodes de filtrage par banc d'ondelettes (WFB) et sur le filtrage adaptatif exploitant un modèle autorégressif (ARAF). Leur analyse a montré qu'elles offrent des qualités de segmentation inférieures aux deux méthodes précitées. Toutes deux présentent une grande sensibilité aux variations du contenu harmonique des formes d'onde et une stabilité en régime permanent réduite. Leur capacité à détecter les transitoires lents est également en retrait par rapport aux deux méthodes de filtrage présentées dans ce manuscrit. Ces constats sont encore renforcés lorsque les mesures des formes d'onde analysées sont échantillonnées à des fréquences inférieures à 2 kHz. Une évaluation de leurs performances peut être trouvée dans les documents [CAU10b] et [CAU11b]. Ce manuscrit ne les traitera pas plus en détails.

## **7.1. Critères de sélection des indices de segmentation**

Les indices de segmentation doivent vérifier plusieurs propriétés pour répondre aux objectifs fixés au Chapitre 6 et faciliter le calcul des indicateurs de reconnaissance. Plusieurs critères qualitatifs sont définis afin de les comparer. Ils sont explicités dans la suite du paragraphe.

- **Capacité de détection des transitoires**

Le signal déterminé par filtrage des formes d'onde doit présenter une variation significative en présence d'un transitoire. Les variations obtenues étant utilisées par l'algorithme de segmentation pour détecter les changements d'état du réseau, on favorisera les indices dont la capacité à extraire les transitoires est la plus importante. Cette propriété doit être vérifiée pour l'ensemble des perturbations du panel d'évènements recherchés.

- **Temps de réponse aux changements d'état**

À l'apparition d'un transitoire rapide, le signal filtré suit une réponse quasi-indicielle présentant des fluctuations de forte amplitude. Son comportement est caractéristique de la méthode de filtrage appliquée. Son temps de réponse limite la résolution du processus de segmentation puisque deux transitoires séparés par une durée inférieure ou équivalente au temps de réponse du filtre ne peuvent

être dissociés. Il convient de réduire au minimum ce temps de réponse pour maximiser le taux de détection du procédé de segmentation adaptatif. Une problématique similaire intervient dans le choix de la fenêtre d'intégration utilisée pour calculer l'énergie du signal filtré.

- **Sensibilité aux perturbations permanentes**

La régularité des signaux filtrés est affectée par la présence de perturbations permanentes de type harmoniques et bruit dans les formes d'onde mesurées. Pour que la méthode de segmentation soit robuste, la méthode de filtrage puis le calcul de l'énergie doivent limiter les répercussions de telles composantes sur le comportement de l'indice de segmentation.

### 7.2. Estimation de la fréquence fondamentale

La fréquence du réseau est un paramètre évoluant dans une étroite plage de fréquence globalement comprise entre 49,5 Hz et 50,5 Hz. Sauf en cas d'événements majeurs, elle ne quitte pas cette plage de variations. Elle évolue entre ces deux bornes en fonction de l'équilibre de la production et de la consommation par les charges.

#### 7.2.1. Intérêt de l'estimation de la fréquence fondamentale

La qualité de l'évaluation de la valeur de la fréquence fondamentale a des conséquences directes sur le calcul d'un grand nombre de grandeurs électrotechniques essentielles à l'analyse des perturbations observées sur les réseaux électriques. Des erreurs apparaissent sur des grandeurs telles que la valeur efficace, l'amplitude et la phase des composantes harmoniques, les impédances... D'autres procédés d'estimation et de filtrage reposant sur des modèles harmoniques sont aussi concernés. Ces erreurs sont liées au phénomène de fuite spectrale (spectral leakage). Il présente deux origines : la non-adaptation de la fenêtre d'analyse et la non-synchronisation de la fréquence d'échantillonnage.

Lorsque la taille de la fenêtre d'observation utilisée pour le calcul de ces grandeurs n'est pas adaptée à la fréquence fondamentale ( $f_{0\text{ estimée}} \neq f_{0\text{ signal}}$ ), un phénomène de fuite spectrale les affecte [WAN04]. Sans cette synchronisation, de nombreux procédés d'estimation renvoient des résultats erronés. Pour limiter ces erreurs, une évaluation correcte de la fréquence fondamentale du signal au cours de son observation est requise.

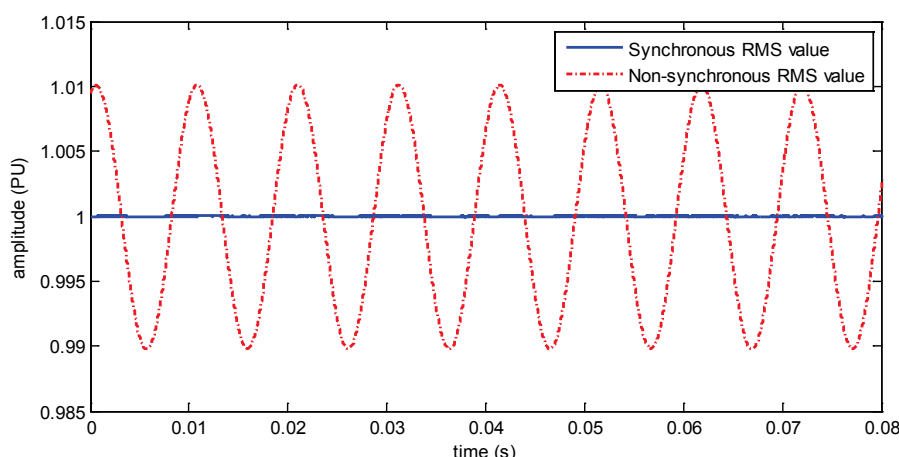
La Figure 7-1 illustre les conséquences de la désynchronisation de la fenêtre d'observation employée pour calculer la valeur efficace d'une tension. Un signal de fréquence fondamentale égale à 49 Hz est utilisé comme référence. Lorsqu'une fenêtre d'observation non synchrone (adaptée à une fréquence de 50 Hz) est utilisée, on observe que la valeur efficace suit un régime oscillatoire autour de la valeur réelle d'amplitude unitaire du signal. Lorsque la fenêtre d'observation est synchrone, c'est-à-dire adaptée à la fréquence du signal 49 Hz, on observe que la valeur efficace est constante et égale à

l'amplitude du signal.

Le pourcentage d'erreur maximal  $\varepsilon_{max}$  dû à la désynchronisation de l'observation avec la fréquence fondamentale du signal peut être approximé, pour la valeur efficace, à l'aide de la relation (2-2). Ainsi, une erreur de 2% sur la fréquence, soit 1 Hz, se traduit par une erreur maximale de l'ordre de 1%. Cette relation est démontrée en Annexe A. Elle n'est valable que pour des erreurs d'estimation limitées ( $|\Delta f_s| = |f_{0\ signal} - f_{0\ estimée}| < 5\text{ Hz}$ ).

$$\varepsilon_{max} \sim \frac{1}{2} \frac{|\Delta f_s|}{f_0} \quad (7-1)$$

La désynchronisation de la fréquence d'échantillonnage des données avec la fréquence fondamentale du signal est également une source d'erreurs. Ces erreurs restent faibles pour des fréquences d'échantillonnage élevées, mais deviennent non négligeables pour des fréquences faibles. Pour des données échantillonnées avec un pas constant, son impact peut être réduit en rééchantillonnant *a posteriori* les données sur l'intervalle d'observation utilisé pour le calcul. La fréquence utilisée pour le rééchantillonnage suit la valeur estimée de la fréquence fondamentale.



**Figure 7-1 – Comportement de la valeur RMS d'un signal à 49 Hz pour une fenêtre synchrone (adaptée à  $f_0 = 49\text{ Hz}$ ) et une fenêtre non synchrone (adaptée à  $f_0 = 50\text{ Hz}$ )**

On suppose la fréquence d'échantillonnage synchronisée avec la fréquence adaptée,  $f_e = k f_{0\ adaptée}$ ,  $k \in \mathbb{N}$

### 7.2.2. Estimation de la fréquence à partir des passages par zéro

De nombreuses méthodes sont proposées dans la littérature pour estimer la fréquence fondamentale des formes d'onde mesurées sur les réseaux électriques (§3.2.2). Nous utilisons une méthode la calculant à partir des passages par zéro du signal obtenu après filtrage passe-bas des formes d'onde des tensions. Cette méthode est sélectionnée en raison de sa mise en œuvre aisée et de son faible coût calculatoire. Bien que simple, ses qualités d'estimation et sa robustesse sont équivalentes à celles de méthodes plus complexes, reposant par exemple sur l'estimation de modèles paramétriques ou sur l'analyse temps-fréquence [BEG93]. Ses cinq principales étapes sont rappelées ici.

### **Filtrage passe-bas du signal**

On applique aux formes d'onde des tensions un filtre FIR de type passe-bas. Il résout le problème des multiples franchissements pouvant survenir à proximité des zéros lorsque le signal est affecté par du bruit ou des perturbations harmoniques haute-fréquence. Sa fréquence de coupure est choisie autour de 75 Hz pour que les harmoniques soient atténués sans que le fondamental soit trop impacté.

### **Recherche des passages par zéro des tensions**

On recherche, dans le signal filtré, deux échantillons successifs ( $k_p-1$  et  $k_p$ ) de signe opposé (7-2).

$$\boxed{\text{sign}(y_{PB}(k_p - 1)) \text{sign}(y_{PB}(k_p)) < 0} \quad (7-2)$$

### **Détermination de l'instant de passage par zéro par interpolation linéaire**

À chaque inversion de signe, l'instant effectif du franchissement de l'axe des abscisses est déterminé par interpolation linéaire à partir des échantillons  $k_p-1$  et  $k_p$  (7-3). Cette approximation est valable en raison du comportement quasi-linéaire des formes d'onde au niveau des passages par zéro.

$$\left. \begin{array}{l} a = \frac{y_{PB}(k_p) - y_{PB}(k_p - 1)}{t(k_p) - t(k_p - 1)} \\ b = y_{PB}(k_p) - a \cdot t(k_p) \end{array} \right\} \longrightarrow t_{\text{passage}}(n) = -\frac{b}{a} \quad (7-3)$$

### **Estimation de la fréquence fondamentale du signal**

La fréquence du signal est ensuite déterminée à partir des instants des passages par zéro présentant une pente de même signe. Deux fréquences distinctes sont déterminées : la 1<sup>re</sup> à partir des passages par zéro de la partie positive vers la partie négative et la 2<sup>de</sup> à partir de ceux de sens opposé (7-4).

$$\boxed{f_{e+} = (t_{\text{passage}}(2i + 2) - t_{\text{passage}}(2i))^{-1} \quad f_{e-} = (t_{\text{passage}}(2i + 3) - t_{\text{passage}}(2i + 1))^{-1}} \quad (7-4)$$

### **Moyenne des fréquences déterminées sur chaque voie de tension**

Les fréquences  $f_{e+}$  et  $f_{e-}$  déterminées pour chaque voie de tension sont ensuite moyennées. Une nouvelle estimation de la fréquence fondamentale est obtenue toutes les  $\frac{1}{2}$  périodes pour chaque voie de mesure analysée.

### **7.2.3. Gestion des informations de fréquence**

Deux mécanismes supplémentaires sont adjoints à cette méthode pour limiter les erreurs d'estimation.

- ✓ Dès la détection d'un transitoire, l'estimation de la fréquence du système n'est plus utilisée. La dernière valeur de la fréquence mesurée avant la détection du transitoire est conservée et utilisée. L'estimation est à nouveau prise en compte lorsqu'un régime de fonctionnement permanent est atteint.

- ✓ En l'absence de tension sur une ou plusieurs des voies de mesure, les fréquences calculées pour ces voies ne sont plus considérées dans l'estimation globale de la fréquence. En cas de déconnexion totale (tension nulle sur les trois tensions), la dernière estimation de la fréquence est conservée jusqu'au retour des tensions, c'est-à-dire jusqu'à la reconnexion du point de mesure au réseau de distribution.

Cette méthode est efficace en présence de perturbations permanentes telles que les harmoniques et le bruit. Elle est par contre sensible à la présence de composantes fréquentielles basses fréquences qui induisent un comportement oscillatoire sur l'estimation. De tels phénomènes peuvent survenir lors des transitoires des défauts monophasés survenant sur les réseaux compensés ou dans certains systèmes de régulation de puissance.

### 7.3. Méthodes de filtrage des formes d'onde

L'étape de filtrage analyse les formes d'onde des tensions et des courants. Elle fournit des signaux présentant des variations significatives sur les intervalles correspondant aux transitoires des perturbations. Elle conditionne fortement le comportement de l'indice de segmentation obtenu à la fin du pré-traitement, car elle lui confère une grande partie de ses propriétés. Différentes méthodes de filtrage ont été comparées en fonction des critères présentés au paragraphe 7.1 [CAU10b]. Les deux méthodes de filtrage retenues – le filtrage anti-harmoniques et le filtrage de Kalman – et leur mise en œuvre sont présentées dans ce mémoire.

#### 7.3.1. Filtrage anti-harmoniques (AHF)

##### 7.3.1.1. Principe du filtrage anti-harmoniques

Le filtrage anti-harmoniques repose sur l'hypothèse suivante : en régime de fonctionnement normal, les formes d'onde des tensions et des courants sont uniquement composées de la fréquence fondamentale et de ses composantes harmoniques. Il s'agit d'un filtre en peigne s'exprimant de manière générique à partir de l'expression (7-5). A notre connaissance, il n'a jamais été utilisé comme support pour des méthodes de segmentation de perturbations électrotechniques.

Appliqué à l'analyse des formes d'onde mesurées sur un système électrique, ce filtre élimine le fondamental et les composantes harmoniques de régime permanent (Figure 7-2). Ces fréquences sont supprimées en soustrayant (ou ajoutant) au signal observé une version retardée de lui-même. Des interférences destructrices sont ainsi générées à ces fréquences. Les fréquences atténuées par le filtre sont sélectionnées en réglant son retard  $\tau$ . Sa forme très simple et sa capacité à éliminer les perturbations harmoniques en font un traitement privilégié.

$$y(k) = x(k) - x(k - \tau) \xleftrightarrow{k \leftrightarrow \omega} H(\omega) = 1 - e^{-j\omega\tau} \quad (7-5)$$

Où :  $\tau$  est le retard du filtre anti-harmoniques

Pour éliminer le fondamental et les composantes harmoniques du signal, le retard du filtre anti-harmoniques doit être un multiple de la demi-période fondamentale ( $\tau = k T_0/2 = k/2f_0$ , avec  $k \in \mathbb{N}^*$ ). Cette dépendance explique que la qualité du filtrage anti-harmoniques est fonction de la précision de l'estimation de la fréquence fondamentale de la forme d'onde.

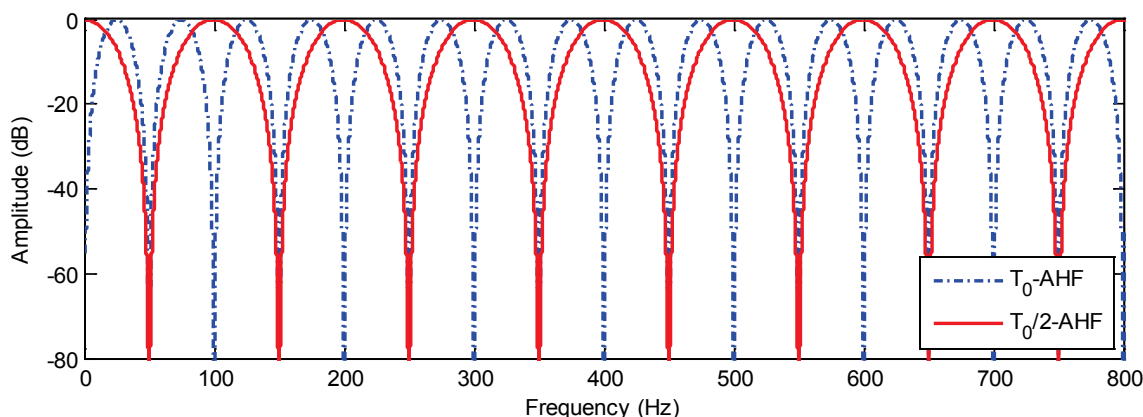


Figure 7-2 – Découpage de l'espace fréquentiel par deux filtres anti-harmoniques

### 7.3.1.2. Mise en œuvre du filtrage anti-harmoniques

Le retard du filtre  $\tau$  conditionne l'élimination du fondamental et des composantes harmoniques présentes dans le signal. Suivant les harmoniques que l'on choisit d'éliminer, deux valeurs de retard et donc deux filtres anti-harmoniques sont envisageables pour extraire les transitoires des perturbations électrotechniques (Figure 7-2).

- Pour éliminer le fondamental et l'ensemble des composantes harmoniques de la forme d'onde, on utilise un filtre dont le retard est égal à la période du fondamental. Ce filtre est désigné dans ce manuscrit sous l'appellation de *filtre anti-harmoniques total* ( $T_0$ -AHF). Il est calculé à l'aide de la relation suivante :

$$y(k) = x(k) - x(k - T_0) \quad (7-6)$$

- Pour éliminer le fondamental et les seuls harmoniques de rangs impairs, on emploie un filtre de retard égal à une demi-période. Ce filtre est désigné par le terme de *filtre anti-harmoniques impairs* ( $T_0/2$ -AHF). Il s'exprime avec l'équation suivante :

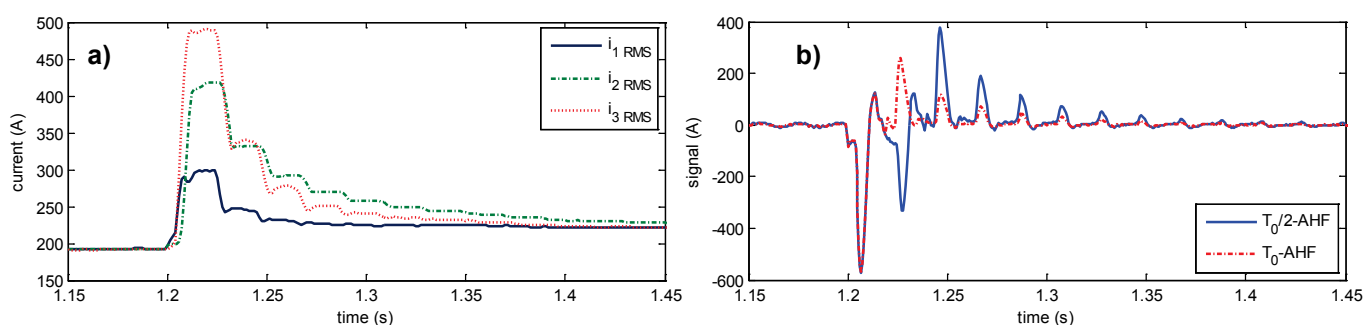
$$y(k) = x(k) + x(k - T_0/2) \quad (7-7)$$

L'utilisation du second filtre ne pose pas de problèmes particuliers car, en régime permanent, les formes d'onde ne comportent pas d'harmoniques pairs et de composante continue. Les négliger n'a aucune incidence dans la grande majorité des cas. Sur le réseau de distribution, ces composantes apparaissent principalement lors des enclenchements de transformateurs qui surviennent suite au fonctionnement d'une protection ou à des manœuvres sur le réseau. Elles sont causées par les



phénomènes de saturation magnétique observés au niveau des noyaux des transformateurs perturbateurs, c'est-à-dire ceux enclenchés ou réenclenchés (§2.4).

En choisissant de ne pas tenir compte de ces harmoniques lors de la définition du filtre, on accroît la sensibilité du signal filtré à ce type d'événements : l'énergie contenue dans les transitoires de ces perturbations est plus importante puisqu'une plus grande part du spectre se retrouve dans le signal filtré (Figure 7-3). La propension du procédé de segmentation à détecter ce type d'événements est ainsi augmentée.



**Figure 7-3 – Comportement des filtres anti-harmoniques lors d'un enclenchement de départ**

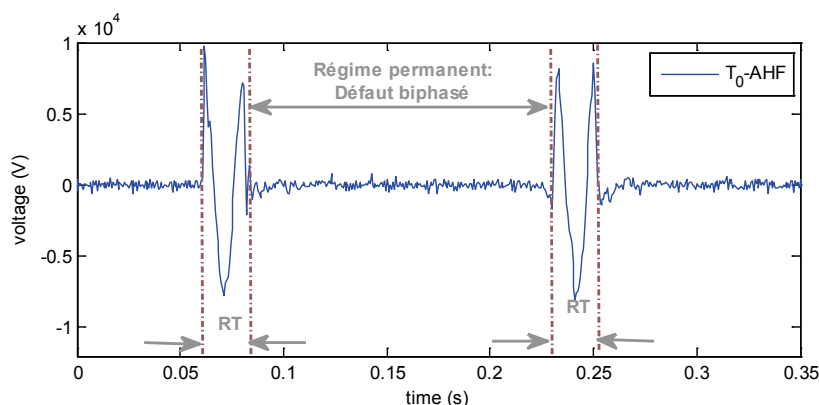
(a) Valeurs efficaces

(b) Courant de la phase 2 après filtrage par  $T_0$ - et  $T_0/2$ -AHF

### 7.3.1.3. Champs d'applications du filtrage anti-harmoniques

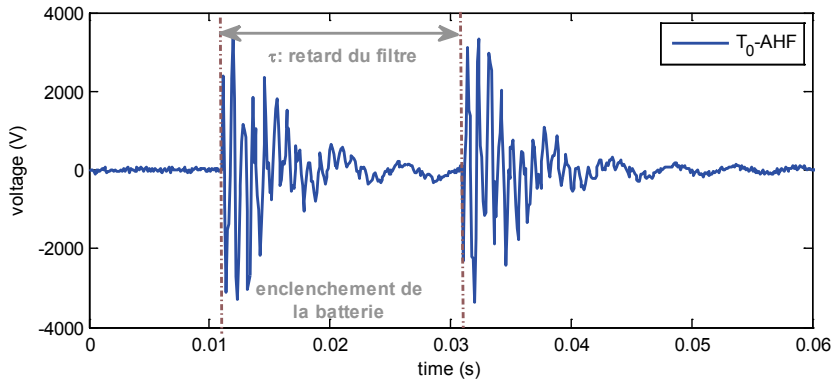
Quelle que soit l'origine de la perturbation (défauts, enclenchements, variations de régime harmonique...), ses transitoires sont riches en composantes fréquentielles non permanentes. Appliquer un filtre anti-harmoniques aux formes d'onde permet d'isoler les intervalles temporels correspondant aux régimes transitoires des perturbations (Figure 7-4 et Figure 7-5).

Cette importante capacité d'extraction se paie par l'apparition dans le signal filtré de « faux transitoires » qui correspondent à une répétition du transitoire initial décalé d'une durée égale au retard du filtre anti-harmoniques. La Figure 7-5 illustre ce phénomène : une période (0,02 ms) après le début du transitoire d'enclenchement, une seconde oscillation amortie d'amplitude équivalente mais de signe opposé apparaît dans le signal filtré.



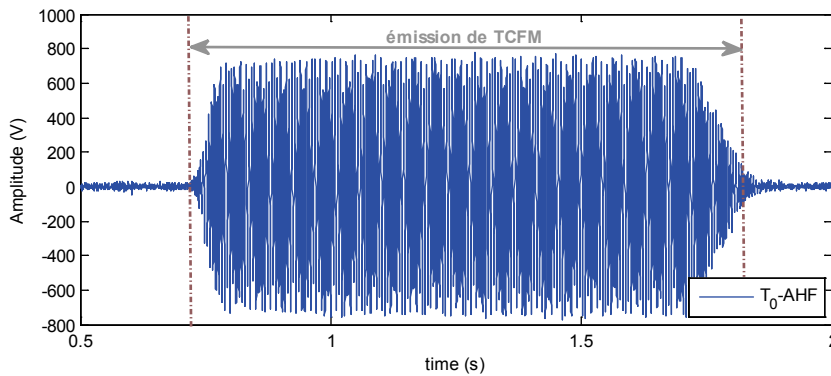
**Figure 7-4 – Extraction des transitoires d'un défaut biphasé isolé**

(Perturbation de la Figure 6-1)



**Figure 7-5 – Extraction du transitoire d'enclenchement de batterie de compensation**

On notera que les filtres anti-harmoniques extraient également les composantes non harmoniques permanentes des formes d'onde (interharmoniques ou TCFM à 175Hz, par exemple). Comme ce filtre n'est pas conçu pour intervenir sur de telles composantes fréquentielles, elles se retrouvent presque intégralement dans le signal filtré (Figure 7-6). Leur atténuation dépend de leur proximité avec une composante harmonique éliminée par le filtre : plus celle-ci est proche, plus l'atténuation est marquée (Figure 7-2).



**Figure 7-6 – Extraction du signal de TCFM de la forme d'onde d'une tension mesurée sur le réseau HTA**

#### 7.3.1.4. Influence des fréquences fondamentale et d'échantillonnage

Deux phénomènes impactent la qualité du filtrage anti-harmoniques : la qualité de l'estimation de la fréquence du fondamental et la synchronisation de la fréquence d'échantillonnage  $f_e$  avec celle du fondamental estimée  $f_{0\text{ estimée}} = f_0 + \Delta f_0$ .

##### **Influence de la fréquence fondamentale du signal**

L'erreur d'estimation de la fréquence fondamentale se répercute sur la qualité de filtrage puisque les fréquences éliminées par le filtre sont décalées par rapport au fondamental et à ses harmoniques. Pour un signal purement sinusoïdal, l'erreur d'estimation de la fréquence fondamentale  $\Delta f_0$  induit une erreur maximale observée sur le signal filtré  $\varepsilon_{\text{max estim}}$  pouvant être approximée par l'expression (7-8). Cette erreur est indépendante de la fréquence d'échantillonnage du signal.

$$\boxed{\max(\varepsilon_{f_0\text{ estim}}) \sim \sin\left(2\pi f_0 \left(\frac{1}{f_0} - \frac{1}{f_{0\text{ estimée}}}\right)\right)} \quad \text{Pour } \Delta f_0 = 1 \text{ Hz, } \max(\varepsilon_{f_0\text{ estim}}) \sim 12\% \quad (7-8)$$

Rapportée aux harmoniques, cette erreur augmente de manière importante. Leur facteur d'atténuation est réduit en raison du décalage croissant entre les composantes du signal et les fréquences éliminées par le filtre anti-harmoniques. Mais, comme leur amplitude relative – c'est-à-dire normalisée par rapport au fondamental – est limitée, leur contribution à l'erreur réelle reste faible.

Pour réduire cette erreur au minimum, la fréquence fondamentale doit être déterminée en continu à l'aide d'un procédé d'estimation robuste (cf. §7.2).

### **Influence de la fréquence d'échantillonnage du signal**

Les enregistrements des formes d'onde traités par le système sont échantillonnés avec une fréquence constante. En raison de ce choix, les fréquences fondamentale et d'échantillonnage sont, au moins localement, désynchronisées, c'est-à-dire que  $f_e \neq k f_0$ , avec  $k \in \mathbb{N}^*$ . Afin de mettre en évidence l'impact du phénomène de désynchronisation, on suppose, dans ce paragraphe, que la fréquence fondamentale estimée est exacte, c'est-à-dire que :  $f_{0 \text{ estimée}} = f_0$ .

Ce phénomène de désynchronisation affecte le délai  $\tau_{\text{estimé}}$  du filtre anti-harmoniques. Dans une telle situation, sa valeur calculée à partir de la fréquence fondamentale du signal  $f_0$  ne correspond pas à un nombre entier d'échantillons. Elle doit être adaptée à la fréquence d'échantillonnage du signal  $f_e$ . La valeur adaptée du délai  $\tau_{\text{numérique}}$  est déterminée à l'aide de la relation (7-9).

$$\tau_{\text{numérique}} = \frac{\text{round}(f_e/f_0)}{f_e} \longleftrightarrow f_{0 \text{ numérique}} = \frac{1}{\tau_{\text{numérique}}} \quad (7-9)$$

Où :  $\text{round}(\cdot)$  est la fonction renvoyant l'entier le plus proche de son argument

La désynchronisation des deux fréquences introduit une erreur  $\Delta\tau = \tau_0 - \tau_{\text{numérique}}$  sur la valeur du retard du filtre numérique. Elle dépend des fréquences fondamentale  $f_0$  et d'échantillonnage  $f_e$ . Elle est bornée et diminue avec la fréquence d'échantillonnage en adoptant un comportement hyperbolique.

L'erreur sur le délai du filtre numérique se répercute sur sa fréquence de référence  $f_{0 \text{ numérique}}$  (7-9). Cette fréquence est décalée d'une valeur  $\Delta f_{0 \text{ desynch}}$  par rapport à la fréquence fondamentale  $f_0$ . Cette erreur dépend de la fréquence d'échantillonnage de la forme d'onde. Comme l'erreur sur le délai, celle sur la fréquence de référence décroît avec la fréquence d'échantillonnage (Figure 7-7). Son enveloppe suit la relation (7-10) démontrée en Annexe A. L'erreur réalisée sur la fréquence de référence du filtre  $f_{0 \text{ numérique}}$  est importante pour les faibles fréquences d'échantillonnage. Elle est comprise entre 0,12 Hz et 0,79 Hz pour des fréquences comprises entre 1,6 kHz et 10 kHz.

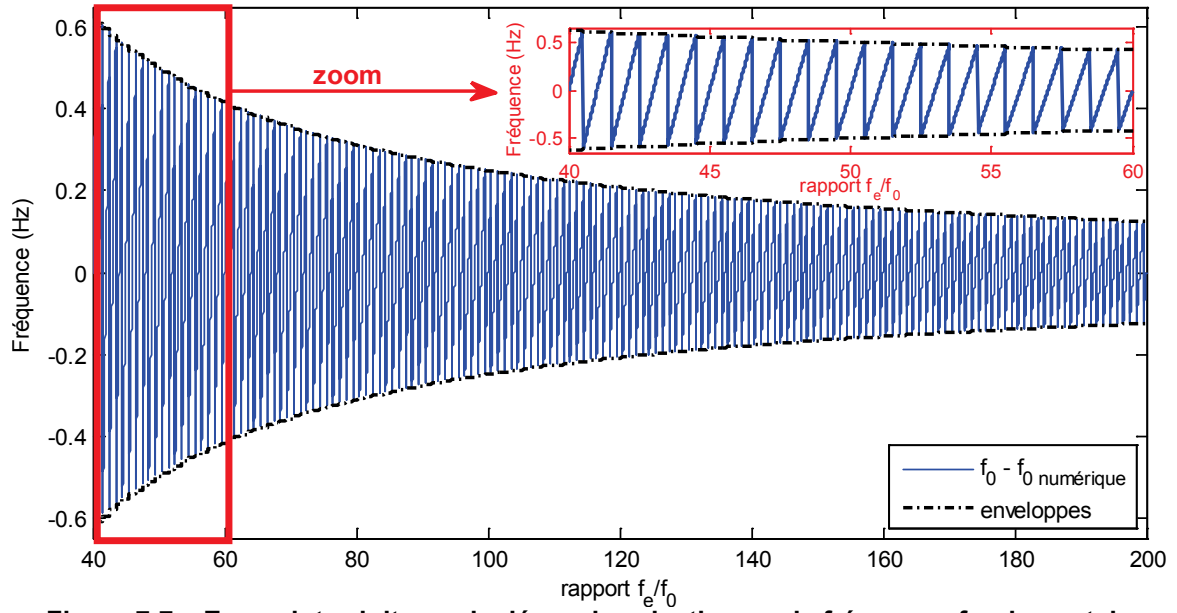
$$|\Delta f_{0 \text{ desynch}}| < \frac{f_0}{2 \text{round}(f_e/f_0)} \quad \begin{array}{l} \text{Pour } f_e = 1,6 \text{ kHz, } \max(\Delta f_{0 \text{ desynch}}) \sim 0,79 \text{ Hz} \\ \text{Pour } f_e = 10 \text{ kHz, } \max(\Delta f_{0 \text{ desynch}}) \sim 0,125 \text{ Hz} \end{array} \quad (7-10)$$

Cette erreur réduit la qualité du filtrage puisque le décalage sur la fréquence de référence se propage de façon linéaire aux fréquences harmoniques éliminées par le filtre (7-11). Dans ces conditions,

l'atténuation des harmoniques des formes d'onde par le filtre anti-harmoniques numérique est progressivement réduite.

$$|\Delta f_h| = h |\Delta f_{0 \text{ desynch}}| < h \frac{f_0}{2 \text{round}(f_e/f_0)} \quad \text{Où : } h \text{ est le rang de l'harmonique considéré} \quad (7-11)$$

L'erreur obtenue par filtrage numérique dépend non-seulement de la désynchronisation entre la fréquence fondamentale et celle d'échantillonnage mais également de la position du point considéré sur la forme d'onde (Figure 7-9.b). Cette erreur est maximale à proximité de ses passages par zéro.



**Figure 7-7 – Erreur introduite par la désynchronisation sur la fréquence fondamentale ( $f_e$  varie de 2 kHz à 10 kHz)**

L'erreur due à la désynchronisation  $\varepsilon_{f_e/f_0}$  est approximée par l'expression (7-12). La Figure 7-9.b montre qu'elle peut atteindre des valeurs de 9,8% à 1,6 kHz et 1,5% à 10 kHz.

$$\varepsilon_{f_e/f_0}(t) \sim \sin(2\pi f_0 \Delta \tau) \cos(2\pi f_0 t) \quad \begin{array}{l} \text{Pour } f_e = 1,6 \text{ kHz, } \max(\varepsilon_{f_e/f_0}) \sim 9,8\% \\ \text{Pour } f_e = 10 \text{ kHz, } \max(\varepsilon_{f_e/f_0}) \sim 1,57\% \end{array} \quad (7-12)$$

### Correction de l'erreur de désynchronisation

Afin d'améliorer les performances du filtrage, on cherche à s'affranchir des limitations dues à l'utilisation d'un signal échantillonné. On choisit d'interpoler le signal numérique à l'instant temporel correspondant à la valeur estimée du retard du filtre  $\tau_{estimée} = 1/f_{0 \text{ estimée}}$  (Figure 7-8). La contribution de la désynchronisation à l'erreur de filtrage est ainsi réduite.

La méthode d'interpolation du signal emploie un modèle linéaire pour limiter au maximum la complexité du module de pré-traitement des formes d'onde. Elle utilise les deux échantillons ( $t - t_1$  et  $t - t_2$ ) encadrant l'instant correspondant au retard du filtre estimé ( $t - \tau_{estimé}$ ) et calcule la valeur du signal en ce point (7-13) (Figure 7-8).

$$y(t - \tau_{\text{estimé}}) = y(t - t_1) + f_e \cdot (y(t - t_2) - y(t - t_1)) \cdot (t_1 - \tau_{\text{estimé}})$$

(7-13)

Où :  $t_1, t_2$  sont les marqueurs temporels des échantillons encadrant le délai du filtre :  
 $\lfloor \tau_{\text{estimé}} \rfloor = t_2 \leq \tau_{\text{estimé}} < t_1 = \lceil \tau_{\text{estimé}} \rceil$

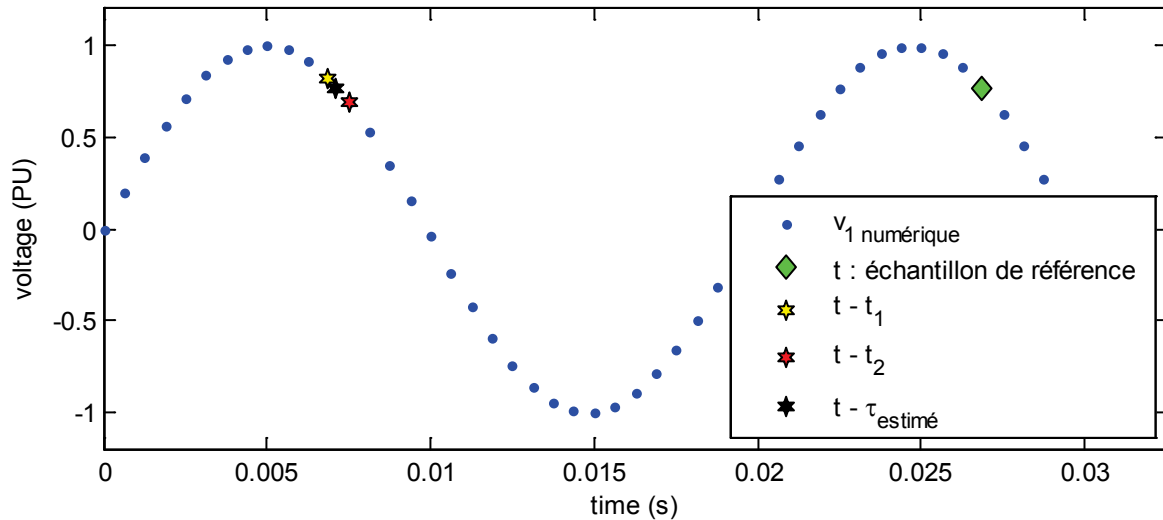
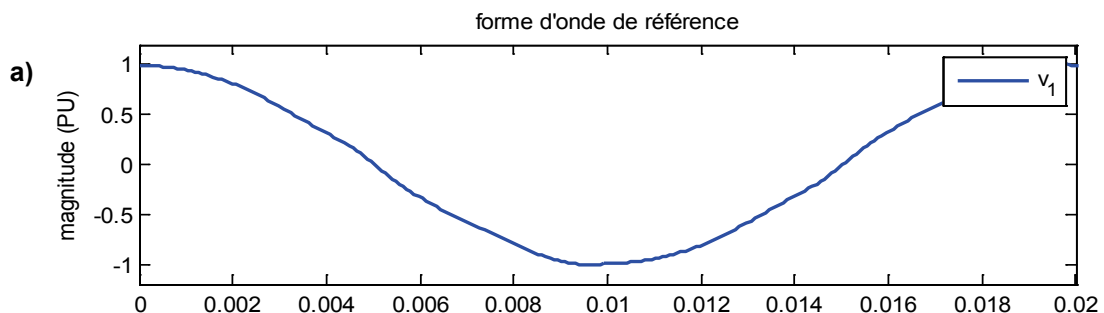


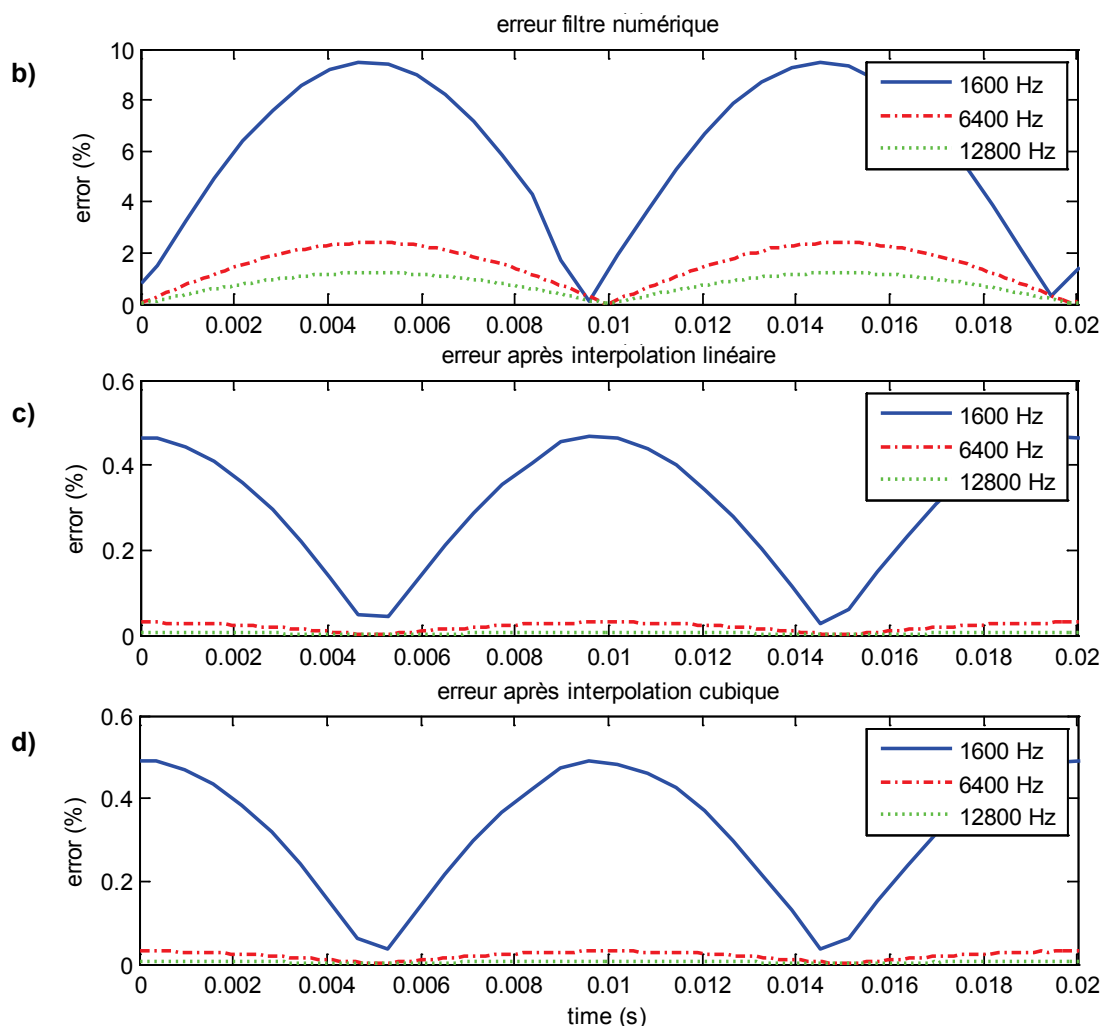
Figure 7-8 – Illustration du procédé d'interpolation linéaire de la valeur retardée du signal

Ce procédé de correction est peu coûteux et améliore notablement l'erreur de filtrage par rapport à celle obtenue en utilisant l'échantillonnage constant du signal numérique. Cette amélioration est particulièrement marquée lorsque des fréquences d'échantillonnage peu élevées sont utilisées (Figure 7-9.c). Dans une situation de désynchronisation maximale, l'erreur obtenue après filtrage est réduite d'un rapport supérieur à 20 pour un signal échantillonné à 1,6 kHz. Pour des fréquences plus élevées, la correction permise par l'interpolation est plus réduite mais reste importante.

On notera que le gain permis par une méthode d'interpolation cubique est faible par rapport à celui permis par l'interpolation linéaire, alors qu'elle est algorithmiquement plus complexe (Figure 7-9.d). Cette constatation est vérifiée quelle que soit la fréquence d'échantillonnage.

On observe également que les maxima de l'erreur de filtrage obtenue après correction coïncident avec les extrema locaux des formes d'onde. Cette distribution géométrique est différente de celle observée pour le filtrage numérique simple : la position des maxima locaux de l'erreur du filtrage obtenu après correction correspond à celle des minima de l'erreur numérique sans correction.





**Figure 7-9 – Comportement de l'erreur de filtrage anti-harmoniques dans le cadre d'un filtre numérique direct (b) et de filtres avec corrections linéaire (c) et cubique (d) dans une situation de désynchronisation maximale entre le fondamental et l'échantillonnage**

La forme d'onde de tension utilisée comme référence est bruitée et possède un THD d'environ 3%.  
On suppose que l'estimation de la fréquence fondamentale est parfaite, c'est-à-dire que :  $f_{0 \text{ estimée}} = f_0$ .

### 7.3.2. Filtrage de Kalman

#### 7.3.2.1. Principe du filtrage de Kalman et sélection du modèle

Un filtre de Kalman est un estimateur récursif, capable d'évaluer les paramètres d'un système observé à partir d'un modèle d'état préalablement défini. Ce modèle est déterminé par approximation du comportement des signaux analysés en régime permanent. Il suppose que les formes d'onde peuvent être approximées par le fondamental et un nombre limité de  $N$  composantes harmoniques. Cette hypothèse est plus restrictive que celle formulée par le filtre anti-harmoniques puisque le nombre de composantes harmoniques considérées est restreint.

On choisit d'employer un *système linéaire* construit sur ce modèle harmonique (7-14) pour analyser

les formes d'onde des tensions et des courants mesurées sur les réseaux. Ce modèle comporte le fondamental et  $N-1$  composantes harmoniques d'amplitude et de phase inconnues mais de fréquences supposées connues. Cette hypothèse impose que la fréquence fondamentale des formes d'onde soit préalablement estimée par un procédé différent.

$$x(t) = \sum_{i=1}^N A_{h_i} \sin(\omega_0 h_i t + \varphi_{h_i}) \quad \text{Où : } h_i \text{ est une composante harmonique du modèle} \quad (7-14)$$

Le choix d'un modèle linéaire est motivé par des considérations de simplicité algorithmique, de vitesse de convergence et de stabilité de l'estimation en régime permanent. En effet, si un modèle non-linéaire suit la fréquence fondamentale sans l'aide d'un procédé externe, ce degré de liberté se paie par une dégradation des performances.

### 7.3.2.2. Mise en œuvre du filtrage de Kalman

La qualité de l'estimation du filtre de Kalman dépend essentiellement de deux facteurs : la corrélation entre le contenu spectral du signal et le modèle harmonique du filtre ainsi que le traitement des bruits de mesure et de modélisation.

#### Sélection des composantes incluses dans le modèle harmonique

Les composantes fréquentielles intégrées au modèle d'état sont éliminées par le filtre de Kalman. Celles non incluses se retrouvent dans l'erreur d'estimation avec un facteur d'atténuation variable dépendant du modèle et des réglages du filtre.

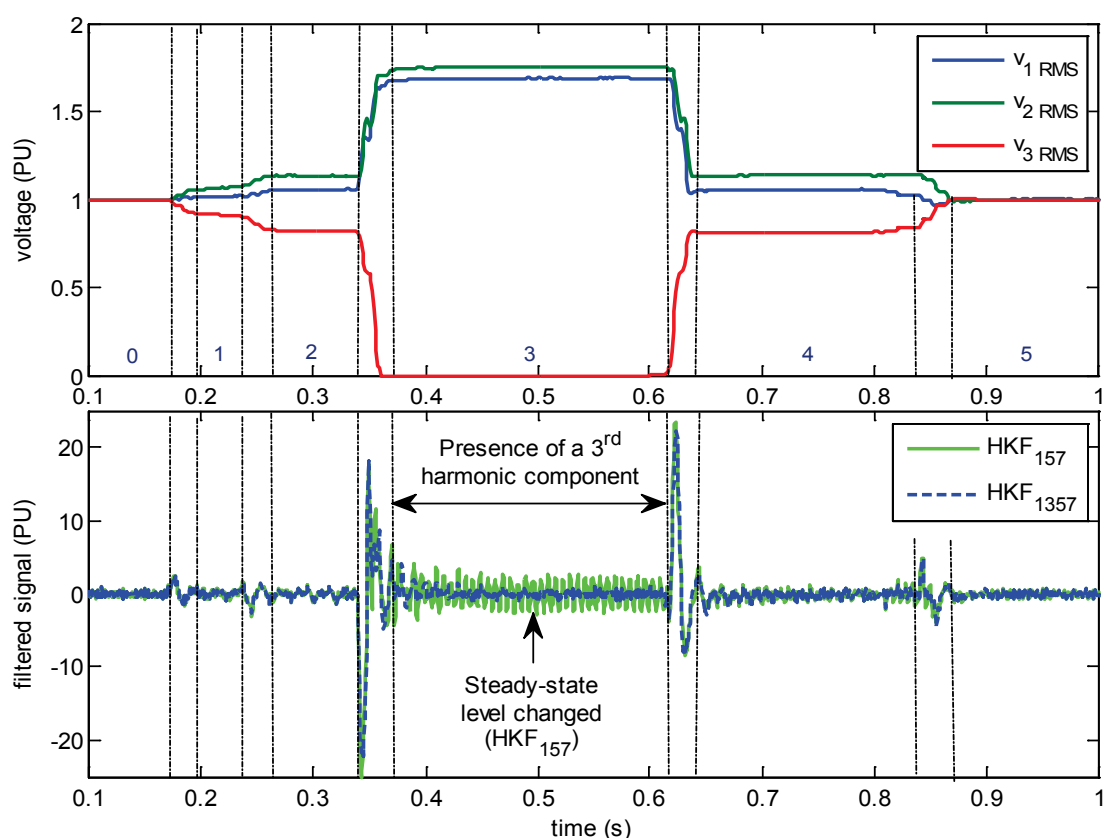
Pour désensibiliser l'estimation à la présence de perturbations harmoniques, la sélection préalable des principales composantes spectrales du signal est nécessaire. Elles sont ensuite incluses dans le modèle harmonique utilisé par le filtre de Kalman. Ainsi, plus la richesse harmonique des formes d'onde est grande, plus le nombre de composantes à intégrer dans le modèle est important. Leur prise en compte assure un comportement plus stable et régulier en régime permanent (Figure 7-10).

L'amélioration de la qualité de l'estimation des composantes du signal lors des régimes permanents pousse à introduire un maximum de composantes fréquentielles dans le modèle. L'augmentation de l'ordre du modèle harmonique exploité par le filtre présente toutefois plusieurs inconvénients.

- ✓ Le temps de réponse de l'estimation augmente progressivement avec l'ordre du modèle. Cette caractéristique diminue la résolution du signal filtré et sa capacité à dissocier deux transitoires proches. Dans ces conditions, les performances de segmentation de l'erreur d'estimation sont réduites.
- ✓ La complexité algorithmique de la méthode croît également de manière importante. L'application d'un filtre de Kalman utilisant un modèle harmonique d'ordre  $N$  nécessite l'inversion d'une matrice de taille  $2N$  à chaque pas d'estimation. Le coût de cette opération non triviale augmente avec le nombre d'harmoniques inclus dans le modèle.

Un compromis doit par conséquent être trouvé entre la qualité de l'estimation – meilleure en incluant plus d'harmoniques dominants dans le modèle – et le temps de réponse de la méthode – meilleur en réduisant l'ordre du modèle harmonique utilisé.

Afin de répondre à ces conditions, on choisit un modèle d'ordre limité comportant uniquement le fondamental et les harmoniques 3, 5 et 7. Les rangs 5 et 7 sont sélectionnés car ils sont prédominants sur les réseaux de distribution HTA. Le rang 3 est intégré au modèle car il peut apparaître au cours de certains défauts monophasés (3<sup>e</sup> intervalle permanent de la Figure 7-10). Sa prise en compte réduit les variations de l'indice de segmentation pendant les régimes permanents.



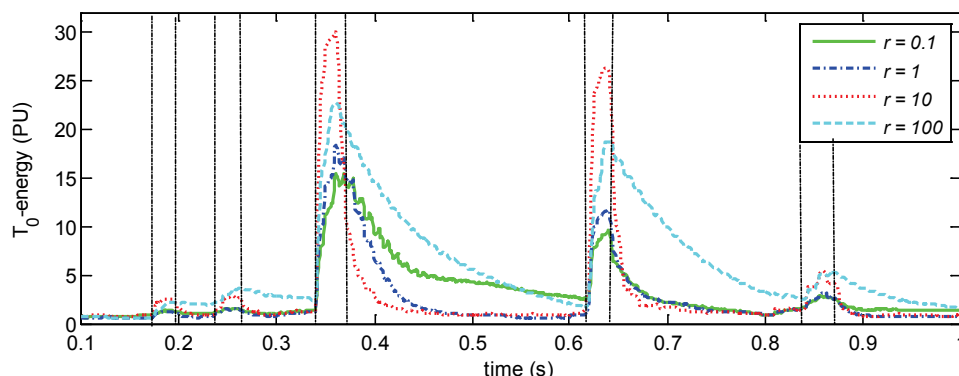
**Figure 7-10 – Impact des composantes harmoniques intégrées au modèle sur l'erreur d'estimation par un filtre de Kalman dont le ratio des covariances est pris égal à 10**

- |   |  |
|---|--|
| <p><b>a) Valeurs efficaces des tensions simples</b></p> <p>0 : régime permanent sans défaut</p> <p>2 : défaut monophasé résistif</p> <p>4 : défaut monophasé résistif</p> | <p><b>b) Erreur de modélisation pour deux modèles harmoniques</b></p> <p>1 : défaut monophasé très résistif</p> <p>3 : défaut monophasé franc (protection shunt)</p> <p>5 : régime permanent sans défaut (départ en défaut déconnecté)</p> |
|---|--|

### Prise en compte des bruits de mesure et de modélisation

Les bruits de mesure et de modélisation interviennent dans les équations du filtre de Kalman au travers de leurs matrices de covariances (resp.  $V$  et  $W$ ). Ces matrices modifient le gain du filtre et conditionnent ainsi le temps de réponse de l'erreur d'estimation.





**Figure 7-11 – Impact du ratio  $r_1$  des covariances  $W_1$  et  $V_1$  sur l'erreur d'estimation du filtre de Kalman avec un modèle comportant le fondamental et les composantes harmoniques 3, 5 et 7**

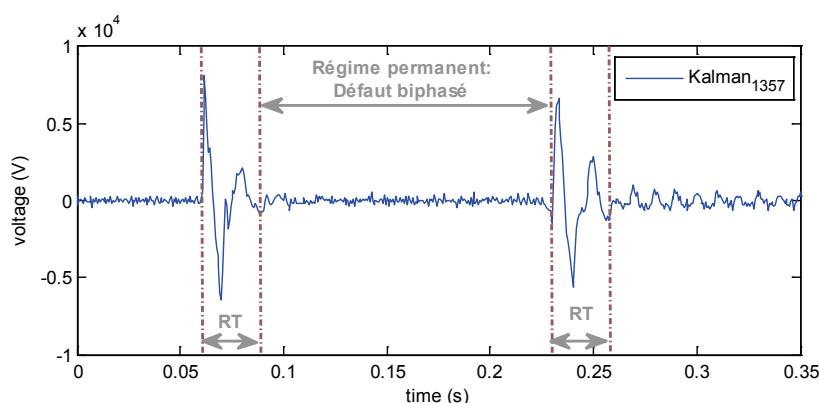
Les rapports  $r_k = W_k/V_k$  définis pour chacune des  $k$  composantes fréquentielles du modèle harmonique permettent d'ajuster le temps de réponse du filtre. Ils correspondent au poids relatif des matrices de covariance des bruits de mesure et de modélisation. La valeur du ratio associé au fondamental  $r_1$  est déterminante pour la dynamique de réponse du filtre de Kalman (Figure 7-11).

L'analyse des formes d'onde mesurées montre qu'un rapport  $r_1$ , dont la valeur est comprise entre 5 et 25, améliore le suivi du filtre et maximise sa capacité d'extraction des transitoires [CAU10a].

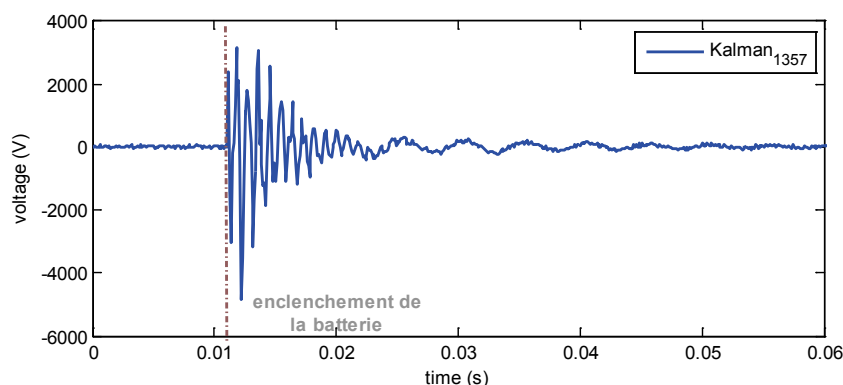
### 7.3.2.3. Champ d'applications du filtrage de Kalman

Le filtre de Kalman précédemment défini est basé sur un modèle harmonique permanent. Comme les composantes fréquentielles contenues dans les transitoires des formes d'onde des tensions et des courants ne vérifient pas ce modèle, elles se retrouvent au moins partiellement dans l'erreur d'estimation. Cette propriété est utilisée pour faire apparaître de manière distinctive, dans le signal filtré, les transitoires de l'ensemble des perturbations recherchées – défauts, enclenchements de départs, variation de régime harmonique... (Figure 7-12 et Figure 7-13).

On observe que, contrairement au signal filtré par un filtre anti-harmoniques, aucun « faux transitoire » n'apparaît à la Figure 7-13. L'erreur d'estimation ne reflète par contre pas le transitoire oscillatoire réel de la perturbation d'enclenchement et ses composantes spectrales ne sont pas conservées.

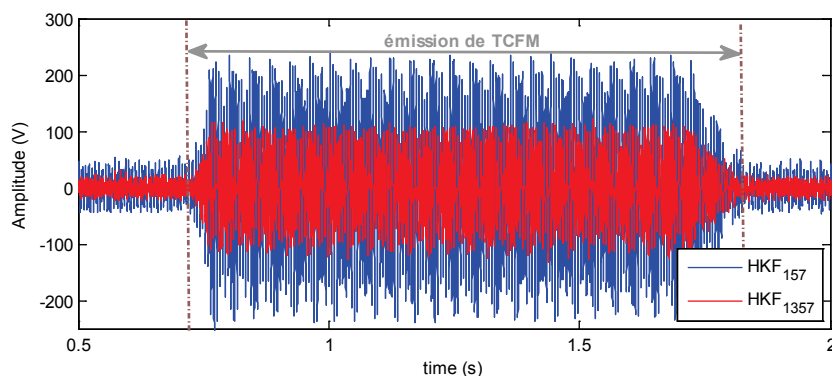


**Figure 7-12 – Extraction des transitoires d'un défaut biphasé isolé  
(Perturbation de la Figure 6-1)**



**Figure 7-13 – Extraction du transitoire d'enclenchement de batterie de compensation**

Les composantes non harmoniques permanentes telles que les interharmoniques ou la TCFM à 175 Hz se retrouvent également dans l'erreur d'estimation. Le modèle utilisé par le filtre n'est en effet pas conçu pour observer ce type de composantes fréquentielles (Figure 7-14). Leur atténuation est par contre plus importante que dans le cas du filtrage anti-harmoniques en raison de la faculté d'adaptation du filtre de Kalman (Figure 7-6). Ce phénomène est amplifié lorsque la fréquence en question est proche d'une des composantes harmoniques incluses dans le modèle : à la Figure 7-14, l'ajout de l'harmonique 3 dans le modèle considéré par le filtre réduit la valeur de l'erreur d'estimation lors de l'injection de TCFM. Ce phénomène s'explique par le nombre de degrés de liberté plus important du filtre de Kalman par rapport au filtre anti-harmoniques.



**Figure 7-14 – Extraction du signal de TCFM de la forme d'onde d'une tension mesurée sur le réseau HTA**

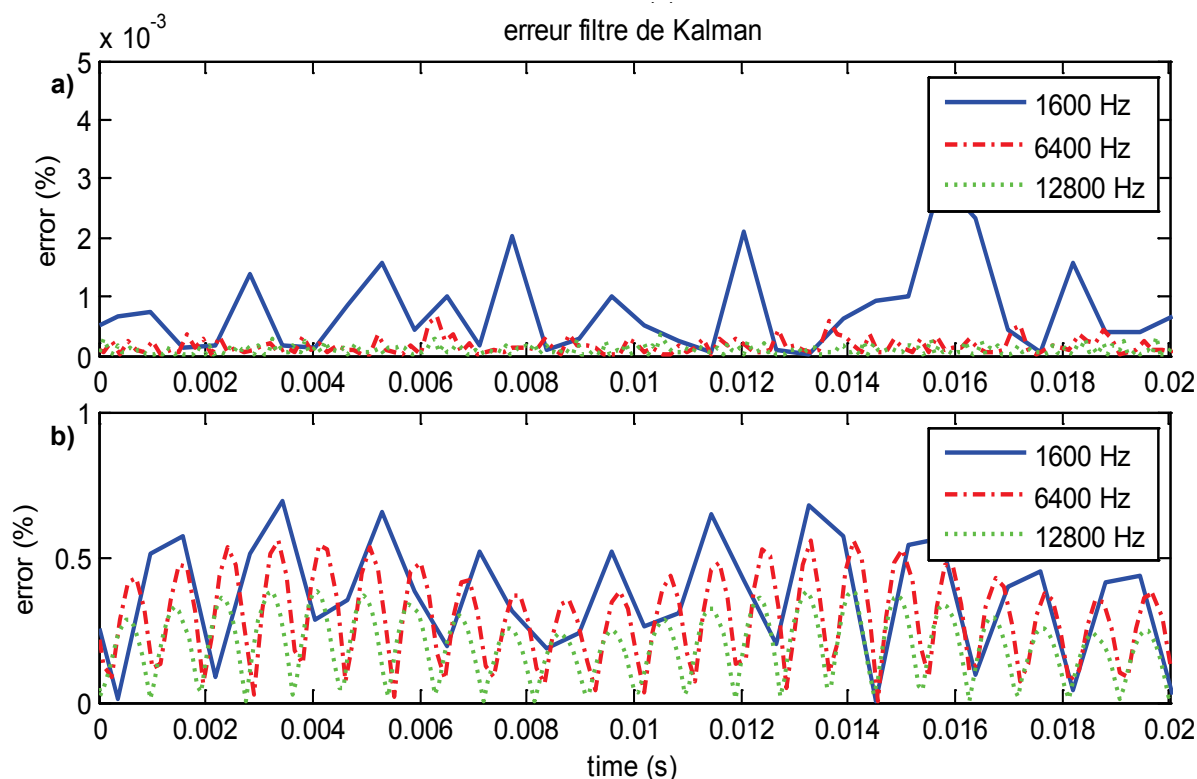
#### 7.3.2.4. Influence des fréquences fondamentale et d'échantillonnage

Comme le filtrage anti-harmoniques, la qualité de suivi permise par le filtre de Kalman dépend de l'estimation de la fréquence fondamentale. Les erreurs d'évaluation de la fréquence fondamentale impactent cependant moins le comportement de l'erreur d'estimation du modèle grâce au caractère adaptatif du filtre. Il dispose de plusieurs degrés de liberté qui lui permettent d'intégrer, à chaque évaluation, l'erreur de prédiction et de faire évoluer sa matrice de covariance. Plus l'ordre du modèle est important, moins le filtre est sensible. Un tel comportement est invisable pour les filtres anti-harmoniques dont la forme est fixe. Leur retard  $\tau$  est leur seul degré de liberté.

Le filtrage de Kalman présente un second avantage. Sa capacité à travailler sur un signal échantillonné avec un pas non constant le rend insensible aux problématiques de fréquence d'échantillonnage. Contrairement au filtrage anti-harmoniques, aucune synchronisation entre la fréquence d'échantillonnage et la fréquence fondamentale n'est requise. Ces variations sont directement intégrées par le modèle d'état utilisé par le filtre du moment que la fréquence d'échantillonnage exacte soit connue.

Cette propriété est illustrée à la Figure 7-15–a. Le comportement de l'erreur déterminée par filtrage de Kalman y est obtenu dans des conditions similaires à celles de la Figure 7-9. On observe que l'erreur ne présente pas de dépendance particulière vis-à-vis de sa position sur la forme d'onde. Elle reste faible quelle que soit la fréquence d'échantillonnage du signal.

En comparant le comportement de l'erreur dans les cas où le signal comprend l'ensemble des harmoniques dominants et où il ne comporte que les harmoniques 5 et 7, on met également en évidence l'importance du choix du modèle utilisé. La présence dans le signal de composantes fréquentielles non intégrées au modèle augmente de manière importante l'erreur déterminée par le filtre de Kalman. Ces fréquences apparaissent clairement sur le comportement de l'erreur. A la Figure 7-15–b, en présence d'harmoniques 11 et 13, on observe que l'erreur d'estimation oscille de manière régulière.



## 7.4. Calcul de l'énergie du signal filtré

Quelle que soit la méthode de filtrage utilisée, les signaux obtenus se comportent de manière similaire lors des changements d'état du réseau. Ils présentent d'importantes variations pendant les régimes transitoires et adoptent un comportement quasi-stationnaire au cours des régimes de fonctionnement permanents du réseau [BOL06].

Ces signaux ont une sensibilité variable aux harmoniques et au bruit contenus dans les formes d'onde analysées. Cette sensibilité est fonction de la méthode de filtrage utilisée et de sa mise en œuvre. Elle rend délicate l'interprétation directe des signaux filtrés.

Pour faciliter l'extraction des transitoires, on cherche à limiter l'impact de ce type de perturbations sur le signal traité par l'algorithme de segmentation. Ce signal est désigné dans ce mémoire par l'appellation « indice de segmentation ». Pour atteindre cet objectif, on calcule l'énergie du signal filtré.

Dans l'ensemble de ce manuscrit, on utilise l'énergie des signaux filtrés comme « indice de segmentation ». Ce calcul d'énergie est la dernière étape du pré-traitement des formes d'onde.

### Propriétés du calcul de l'énergie

L'énergie du signal filtré est calculée sur une fenêtre d'observation glissante. Pour que l'indice de segmentation soit stable en régime permanent, l'intégration du signal requiert que la taille de la fenêtre  $T$  soit référencée par rapport à sa fréquence fondamentale  $f_0$  (7-15).

La grandeur « énergie » présente plusieurs avantages :

- L'intégration du signal induit un effet passe-bas qui limite l'influence du bruit. La fréquence de coupure du filtre passe-bas équivalent dépend de la taille de la fenêtre d'intégration utilisée. Plus celle-ci est courte, plus la fréquence de coupure est élevée et moins le filtre est sélectif.
- Le référencement de la taille de la fenêtre par rapport à la fréquence fondamentale élimine les fluctuations de l'énergie causées par le fondamental et les composantes harmoniques du signal. Cette désensibilisation n'est efficace que si la fréquence fondamentale du signal est déterminée avec suffisamment de précision.

Par contre, quelle que soit la taille de la fenêtre choisie, la grandeur obtenue est sensible aux perturbations interharmoniques permanentes. Des fluctuations significatives apparaissent en leur présence.

$$E(t_k) = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=-T/2}^{T/2} y_{\text{filtré}}^2(t_{k+i})} \quad (7-15)$$

### **Influence de la taille de la fenêtre d'intégration**

La taille de la fenêtre d'intégration est choisie en fonction du contenu fréquentiel des signaux filtrés et donc de la méthode de filtrage employée pour mettre en évidence les régimes transitoires.

Pour les méthodes présentées dans ce mémoire (filtrage de Kalman et filtrage anti-harmoniques), des fenêtres de largeurs égales à une période ( $T_0$ ) et à une demi-période ( $T_0/2$ ) sont utilisables.

- Le premier type de fenêtre ( $T_0$ ) désensibilise l'indice de segmentation à l'ensemble des composantes harmoniques du signal filtré. Il lui confère une plus grande stabilité quelles que soient les composantes harmoniques préalablement filtrées.
- L'utilisation de la fenêtre de taille plus réduite ( $T_0/2$ ) sensibilise l'indice de segmentation aux harmoniques pairs. La fenêtre étant plus courte, l'effet passe-bas induit par le calcul de l'énergie est plus faible, car la fréquence de coupure du filtre équivalent est plus élevée. L'indice de segmentation présente également une sensibilité au bruit un peu plus importante. Des fluctuations peuvent également apparaître si une composante continue est présente dans le signal. Ces composantes sont essentiellement dues au mauvais calibrage des voies de mesure de l'appareil de qualimétrie (présence d'offset).

### **Influence de l'estimation de la fréquence fondamentale**

Le calcul de l'énergie des signaux filtrés utilise une fenêtre d'intégration référencée à la fréquence fondamentale. Comme les méthodes de filtrage, il dépend de la qualité de son estimation. En supposant que le signal filtré ne soit pas lui-même perturbé par une mauvaise estimation, les effets de telles erreurs sont similaires à ceux observés pour le calcul de la valeur efficace (§7.2.1). En réalité, le signal calculé par filtrage anti-harmoniques ou de Kalman est également affecté lorsque l'estimation du fondamental est imprécise. Les fluctuations apparaissant sur l'indice de segmentation résultent de l'accumulation des deux erreurs successives.

## **7.5. Etude comparative des indices de segmentation**

Les performances des deux méthodes de filtrage présentées dans ce manuscrit (filtre anti-harmoniques et filtre de Kalman) sont analysées au travers des critères présentés au paragraphe 7.1.

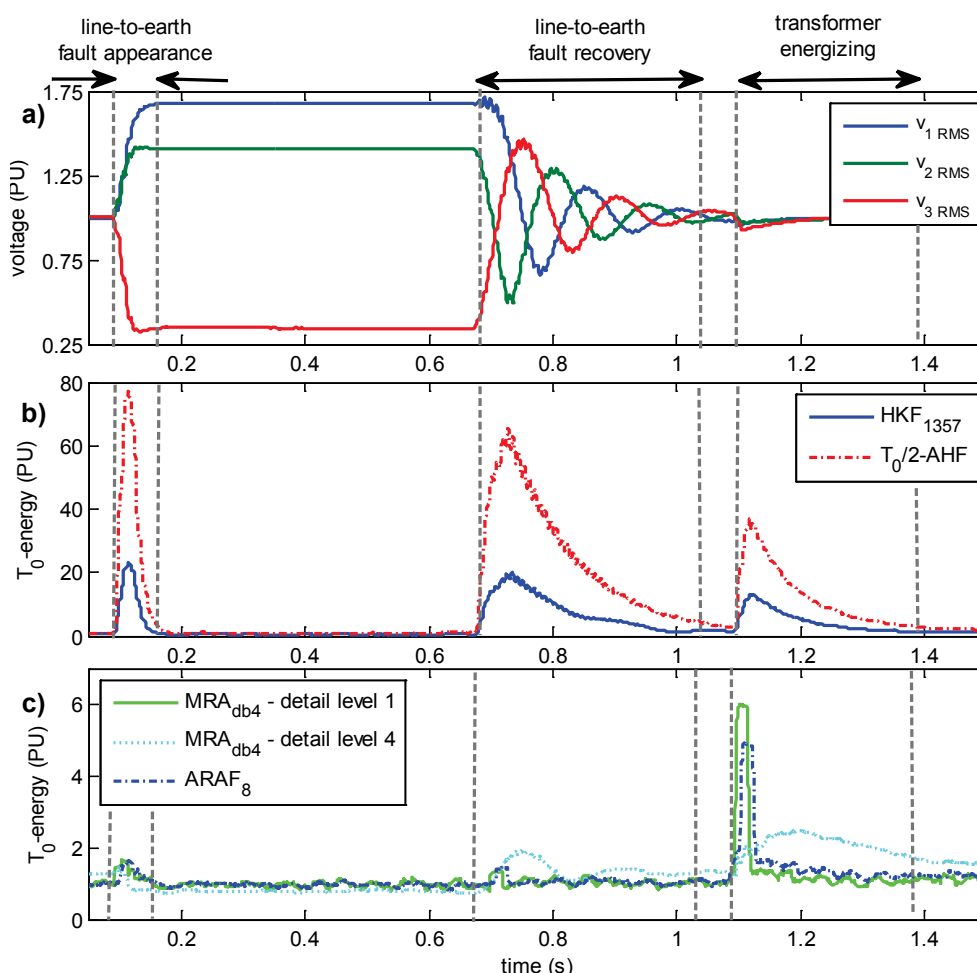
Les principales raisons de leur sélection par rapport aux méthodes de filtrage par banc d'ondelettes et de filtrage adaptatif exploitant un modèle autorégressif sont brièvement rappelées. Des informations complémentaires sont disponibles dans les documents [CAU10a, CAU10b].

### **Capacité de détection des transitoires**

Les capacités de détection des filtres anti-harmoniques et des filtres de Kalman sont très similaires. Leurs signaux filtrés font apparaître la présence des transitoires des différentes catégories de

perturbations. Cette capacité de détection est peu dépendante de la dynamique du transitoire observé. La Figure 7-16–b illustre cette propriété : les transitoires rapides et lents transparaissent de manière similaire dans l'indice de segmentation. Leur aptitude à extraire les transitoires électrotechniques repose sur leurs hypothèses fondatrices : ils supposent que le signal analysé ne comporte que des composantes harmoniques et que la présence d'autres composantes spectrales signale un fonctionnement transitoire du réseau.

Si les deux traitements sont sensibles aux perturbations transitoires, les filtres anti-harmoniques possèdent une capacité d'extraction supérieure (Figure 7-16–b). Le nombre de composantes spectrales du signal qu'ils considèrent comme permanentes est très largement supérieur à celui inclus dans le modèle harmonique du filtre de Kalman. Comme ils sont plus sélectifs, l'énergie du signal filtré est plus faible en régime permanent et permet une meilleure extraction des perturbations dont l'amplitude est plus faible.



**Figure 7-16 – Comportement des indices de segmentation calculés par les filtres de Kalman et anti-harmoniques pour des transitoires de dynamiques différentes**

Ces méthodes de filtrage sont privilégiées au filtrage par banc d'ondelettes et au filtrage adaptatif exploitant un modèle autorégressif des formes d'onde, car ces derniers présentent une capacité de

détection des transitoires très inégale [CAU10b]. Si ces deux types de filtrage sont sensibles à la présence de transitoires rapides, ils signalent difficilement la présence de perturbations dont la dynamique est plus lente ou l'énergie plus faible (Figure 7-16–c). Les transitoires des défauts monophasés affectant les réseaux compensés et les perturbations faiblement énergétiques sont difficilement extraits [CAU11c].

### Temps de réponse

Le temps de réponse  $\tau_{rep}$  d'un indice de segmentation dépend de plusieurs facteurs : la méthode de filtrage, sa mise en œuvre et la fenêtre d'intégration utilisée pour le calcul de son énergie. Il peut être estimé en additionnant le temps de réponse de la méthode de filtrage ( $\tau_{filtrage}$ ) et la taille de la fenêtre d'intégration ( $\tau_{integration}$ ) (7-16).

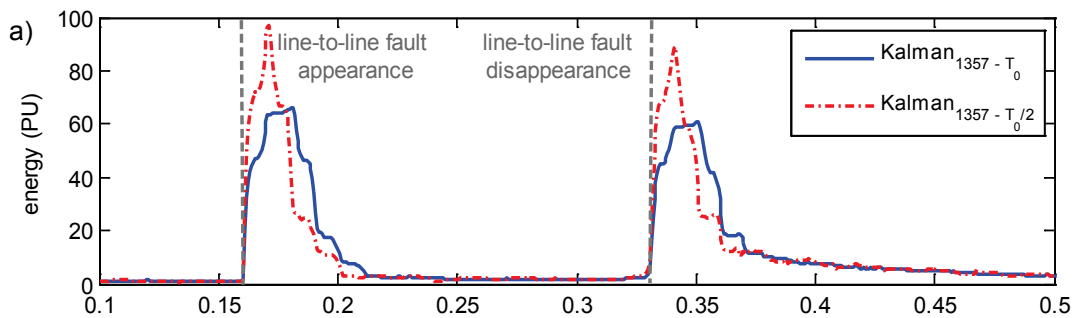
$$\tau_{rep} = \tau_{filtrage} + \tau_{integration}$$

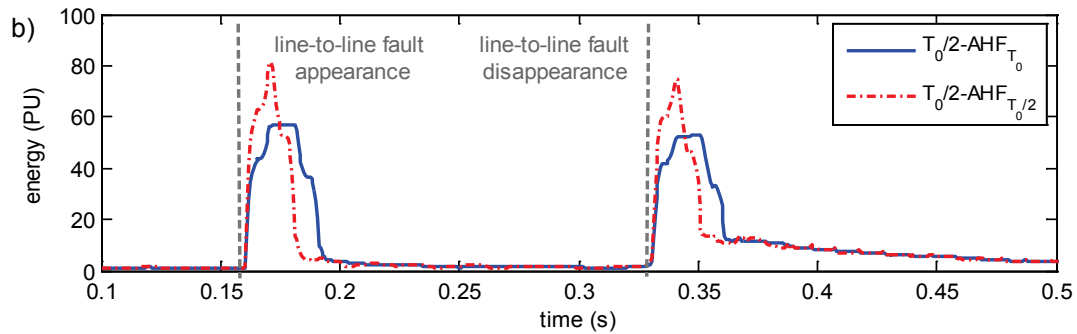
(7-16)

Les méthodes de filtrage présentées dans ce manuscrit présentent un temps de réponse ( $\tau_{filtrage}$ ) relativement proche. Il varie entre une demi-période et une période.

- ✓ Le temps de réponse d'un filtre anti-harmoniques est égal à son délai  $\tau$ . Pour les filtres utilisés dans ce mémoire, il est soit de  $T_0$ , soit de  $T_0/2$ .
- ✓ Le temps de réponse du filtre de Kalman dépend des harmoniques inclus dans le modèle et du rapport des covariances des bruits de modélisation et de mesure (cf. §7.3.2.2). Pour le filtre sélectionné  $HKF_{1357}$  (harmoniques 3, 5 et 7 inclus et ratio des covariances  $r_1$  égal à 10), il est proche de la période du signal  $T_0$ .

L'étape de calcul de l'énergie influence également le temps de réponse de l'indice de segmentation. Pour un même signal filtré, l'indice présente des temps de réponse ( $\tau_{integration}$ ) différents suivant la taille de la fenêtre choisie (Figure 7-17). Cette propriété est liée au fait que le calcul de l'énergie correspond à un filtrage passe-bas du signal dont le temps de réponse est égal à la largeur de la fenêtre d'intégration. Plus elle est courte, meilleurs sont le temps de réponse de l'indice de segmentation et la résolution de l'algorithme.





**Figure 7-17 – Indices de segmentation pour différentes fenêtres d'intégration**

(a) Energie de l'erreur d'estimation déterminée par un HKF<sub>1357</sub> (b) Energie du signal filtré par un  $T_0/2$ -AHF (Perturbation de la Figure 6-1)

Parmi les autres traitements étudiés [CAU10a], seul le filtrage par banc d'ondelettes permet un temps de réponse plus court. Il dépend du niveau de détail considéré : plus le niveau de décomposition analysé est faible, plus le temps de réponse est court. La réduction du temps de réponse est aussi favorisée par l'utilisation de fenêtres de taille adaptative pour le calcul de l'énergie. Au lieu d'utiliser des fenêtres d'intégration standards de taille  $T_0$  ou  $T_0/2$ , cette méthode autorise l'emploi de fenêtres réduites. Leur taille est définie par rapport à la plus basse fréquence de la plage de fréquences analysée. Elle est également normalisée par rapport à la fréquence fondamentale pour réduire sa sensibilité aux perturbations harmoniques (7-17). Le temps de réponse des indices de segmentation déterminés par cette méthode est très inférieur à celui des filtrages anti-harmoniques et de Kalman. Il permettrait théoriquement une meilleure localisation des instants d'apparition des transitoires.

$$N_i = \left\lfloor \frac{f_s}{f_0} \frac{1}{[f_{ci}/f_0]} \right\rfloor \quad \text{Où : } N_i \text{ est le nombre de points de la fenêtre d'intégration}$$

(7-17)

$f_s$  est la fréquence d'échantillonnage du signal

$f_{ci}$  est la fréquence de coupure du  $i^{\text{ème}}$  filtre passe-haut du banc d'ondelettes

### **Sensibilité aux perturbations permanentes**

Comme le temps de réponse, la sensibilité des indices de segmentation dépend de la méthode de filtrage et de la fenêtre utilisée pour l'intégration du signal filtré.

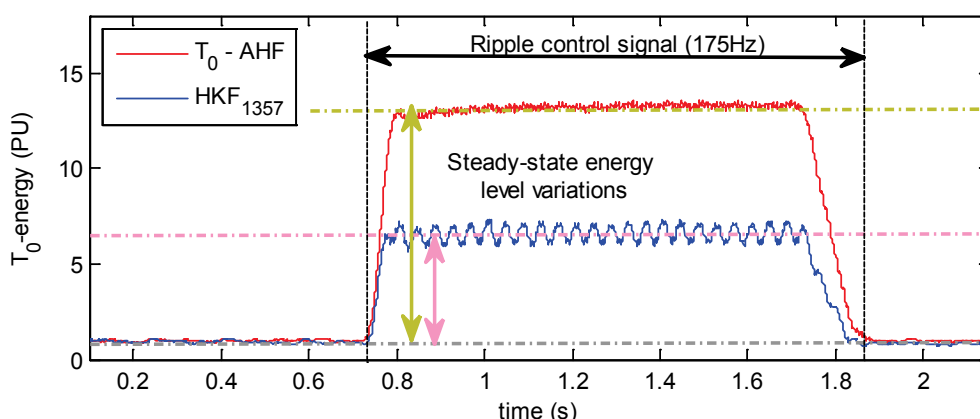
Le filtrage anti-harmoniques est insensible aux perturbations harmoniques du fait de sa structure. Si son délai est égal à une demi-période ( $T_0/2$ -AHF), il est sensible à la présence d'harmoniques pairs et de composante continue. Mais, comme ces harmoniques sont normalement absents en régime permanent, leur sensibilité peut être considérée comme équivalente. Ce filtre est par contre plus sujet aux erreurs de calcul, notamment celles survenant lors de l'évaluation de la fréquence fondamentale, ainsi qu'aux erreurs de mesure, comme la présence d'offset lors de la calibration des voies de mesure.

La sensibilité du filtrage de Kalman est éminemment dépendante des composantes spectrales incluses dans le modèle d'état du filtre. Toute composante principale non incluse se retrouve dans l'erreur d'estimation et nuit à sa stabilité.



Le calcul de l'énergie contribue également à désensibiliser l'indice de segmentation aux perturbations harmoniques. Une fenêtre d'intégration de taille  $T_0$  réduit les fluctuations introduites par l'ensemble des composantes harmoniques. Une fenêtre de taille  $T_0/2$  ne permet pas de le désensibiliser à la présence d'harmoniques pairs.

Quelles que soient la méthode de filtrage et la fenêtre d'intégration sélectionnées, les indices de segmentation présentés dans ce mémoire sont sensibles aux perturbations interharmoniques ou à la TCFM (175 Hz) (Figure 7-18). Seul le filtre de Kalman peut y être désensibilisé en incluant au préalable la composante fréquentielle incriminée dans son modèle d'état.



**Figure 7-18 – Sensibilité des filtres anti-harmoniques et de Kalman aux signaux de TCFM**

Les méthodes de filtrage adaptatif associé à un modèle AR ou de filtrage par banc d'ondelettes présentent une grande sensibilité aux perturbations permanentes de type harmoniques et bruit [CAU10b]. Pour le filtrage adaptatif, cette instabilité est due à la présence des pôles du modèle AR à proximité du cercle unité. Ce caractère est renforcé pour des fréquences d'échantillonnage faibles lorsqu'un nombre de points limité est utilisé. Pour l'analyse multi-résolutions par ondelettes, cette instabilité résulte de la non-élimination des composantes harmoniques des formes d'onde. Celles-ci sont réparties entre les différents niveaux de décomposition. Si les premiers niveaux de détails fournissent la meilleure localisation temporelle des perturbations, ils sont également affectés par les plus grandes variations du spectre harmonique. La grande instabilité de ces deux traitements en régime permanent induit des fausses détections et handicape l'extraction des transitoires réels des perturbations (Figure 7-16-c). C'est l'une des principales raisons de leur écartement.

### Coût calculatoire

L'étude de la complexité calculatoire de l'étape de pré-traitement est essentielle pour envisager l'application en temps-réel de ces traitements. Afin de faciliter leur comparaison, on estime le temps nécessaire à la réalisation du pré-traitement par rapport au calcul de la valeur efficace d'une tension déterminée à une fréquence de calcul équivalente. Cette valeur efficace est calculée sur une fenêtre

d'observation glissante de taille égale à une période ( $T_0$ ). Les résultats de cette comparaison sont résumés au Tableau 1.

L'étape de pré-traitement utilisant le filtrage anti-harmoniques est peu coûteuse quelle que soit la variante utilisée. Sa complexité est équivalente à celle d'un calcul de valeur efficace. Par contre, si un filtre de Kalman est employé, son coût est beaucoup plus important et croît progressivement avec l'ordre du modèle harmonique utilisé.

Tous les indices de segmentation tirent profit à être calculés sur une fenêtre d'intégration plus réduite. Le gain relatif dépend par contre fortement de la méthode de filtrage précédemment utilisée. Il varie globalement entre 2 et 14%.

Indice de segmentation	Fenêtre d'intégration	Temps de calcul relatif	Indice de segmentation	Fenêtre d'intégration	Temps de calcul relatif
HKF <sub>1</sub>	$T_0$	8,0	$T_0$ -AHF	$T_0$	1,04
	$T_0/2$	7,8		$T_0/2$	0,90
HKF <sub>1357</sub>	$T_0$	8,9	$T_0/2$ -AHF	$T_0$	1,03
	$T_0/2$	8,7		$T_0/2$	0,88

**Tableau 1 – Coût calculatoire relatif de l'étape de pré-traitement pour différentes variantes**

On notera que le coût calculatoire du filtrage adaptatif et de l'analyse multi-résolutions est respectivement équivalent et inférieur à celui du filtrage de Kalman [CAU10b].

### Conclusion

Cette analyse critique des méthodes de pré-traitements des formes d'onde a permis d'identifier deux indices de segmentation prometteurs : le filtre anti-harmoniques impairs ( $T_0/2$ -AHF) et le filtre de Kalman associé à un modèle harmonique comportant le fondamental et les harmoniques 3, 5 et 7. Une fenêtre d'intégration de taille égale à une période  $T_0$  est utilisée pour calculer leur énergie. Ces deux indices offrent le meilleur compromis vis-à-vis des critères présentés au paragraphe 7.1.

Au Chapitre 11, on vérifie que ces bonnes performances sont convenablement exploitées par les étapes suivantes du procédé de segmentation adaptatif développé. Ces étapes sont présentées dans les chapitres suivants.

## Chapitre 8 – Détection des transitoires des perturbations

### 8.1. Critères d'évaluation de la détection

L'étape de détection analyse les indices de segmentation déterminés par le pré-traitement et décompose les perturbations en régimes transitoires et permanents. Elle recherche les variations positives des indices de détection, car elles signalent les instants auxquels les transitoires des perturbations débutent.

La méthode de détection des transitoires décrite dans ce manuscrit a été développée afin de répondre aux objectifs de détection présentés au paragraphe 6.2. Elle cherche à obtenir les *taux de détection des transitoires* et de *fausses détections* optimaux. A ce stade, les propriétés liées à la précision de la décomposition n'entrent pas en ligne de compte puisque ce point est traité spécifiquement par le module de correction du retard lors du post-traitement de la décomposition (Figure 6-2).

On notera que les performances de la méthode de détection résultent à la fois des propriétés de l'indice de segmentation et de celles du procédé de détection utilisé. En effet, le taux de détection reflète autant la capacité d'extraction et la résolution du pré-traitement que la capacité de suivi du système de détection. Un constat identique est dressé pour le taux de fausses détections : il résulte à la fois de la stabilité de l'indice de segmentation en régime permanent et de la capacité d'adaptation du système de détection aux changements de régimes de fonctionnement.

Pour que les performances de l'algorithme de détection soient optimales vis-à-vis de ces deux critères, on lui confère des propriétés particulières. Il est en mesure de :

- ✓ s'adapter aux variations des régimes permanents. Il prend en compte les évolutions des régimes harmoniques des formes d'onde accompagnant l'établissement des nouveaux régimes de fonctionnement. Sa capacité à détecter de faibles perturbations est ainsi améliorée sans pour autant dégrader son taux de fausses détections.
- ✓ réaliser un suivi rapide des variations de l'indice de segmentation afin de profiter au maximum de sa résolution. Cette caractéristique améliore le taux de détection des transitoires proches, c'est-à-dire des transitoires pour lesquels un régime permanent n'est pas atteint avant le début du transitoire suivant.

Les performances de détection du système dépendent également de la méthode de correction du retard. Ce procédé appliqué après la détection d'un transitoire corrige *a posteriori* la décomposition des perturbations et améliore la résolution originale de l'algorithme de détection. En corrigeant les

instants d'apparition des transitoires à mesure de leur détection, il permet de distinguer des transitoires plus proches. L'application en continu de telles méthodes augmente le taux de détection des transitoires. Ces méthodes sont décrites en détails au paragraphe 9.1.

Les performances de l'algorithme adaptatif sont évaluées au paragraphe 11.2 en fonction des critères de détection précités. L'impact des méthodes de pré-traitement des formes d'onde et de correction de la segmentation y est également explicité.

### 8.2. Limites du seuillage statique

De nombreux auteurs [GU00a, STY02a, PER06a] emploient des seuils statiques pour procéder à la décomposition des formes d'onde. Ces seuils sont déterminés à partir du comportement en régime permanent de l'indice de segmentation utilisé. La détection des transitoires par de tels seuils repose sur deux hypothèses. Elle requiert que :

- ✓ le niveau des indices de segmentation reste constant sur l'ensemble des régimes permanents des perturbations,
- ✓ les transitoires soient suffisamment espacés pour que les indices de segmentation atteignent un régime permanent avant le début du régime transitoire suivant.

Ces hypothèses sont très réductrices, notamment lors de l'analyse de données réelles. La variabilité du contenu spectral des formes d'onde et la présence de perturbations se succédant à des intervalles de temps proches doivent être considérées. Négliger ces deux phénomènes réduit fortement l'efficacité de la méthode de détection.

Les indices de segmentation présentent couramment des niveaux différents de part et d'autre du transitoire d'une perturbation. Ces différences sont liées aux variations du contenu fréquentiel dues au changement du régime de fonctionnement du réseau. L'amplitude de ces variations dépend directement de la méthode de filtrage employée et de sa sensibilité aux composantes spectrales des formes d'onde (Figure 8-1).

De même, les transitoires proches – par exemple, ceux observés lors de défauts auto-extincteurs – ne sont pas dissociés par des seuils statiques et sont rassemblés en un unique transitoire. L'utilisation de ce type de seuillage réduit la résolution de la détection des transitoires et impacte directement la compréhension des événements obtenus. On notera que l'importance de la diminution de résolution dépend du temps de réponse de la méthode de filtrage employée ; plus celui-ci est faible, plus la perte de résolution est limitée.

La Figure 8-2 illustre ce phénomène. Quel que soit le seuil de détection choisi, au moins une transition est à chaque fois manquée. Lorsqu'un seuil statique basé sur le niveau de l'indice de segmentation observé en régime permanent au début de l'enregistrement est employé (threshold 1), on observe que cinq transitions sont manquées.

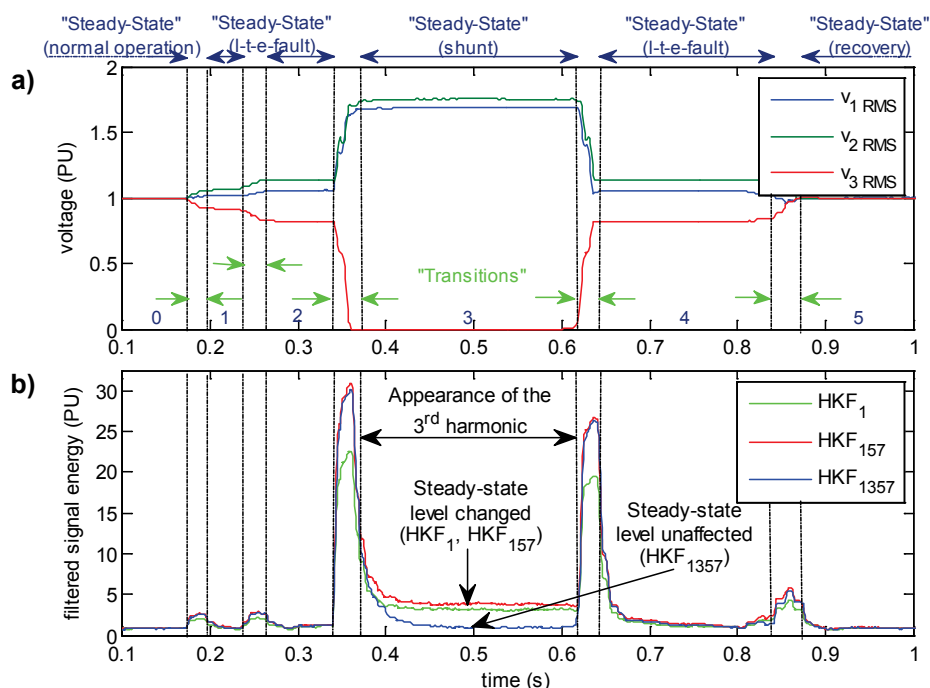


Figure 8-1 – Variation du niveau de régime permanent suite à l'apparition d'un défaut

a) Valeurs efficaces des tensions ; b) Indices de segmentation calculés avec un filtre de Kalman et différents modèles d'état (Perturbation de la Figure 7-10)

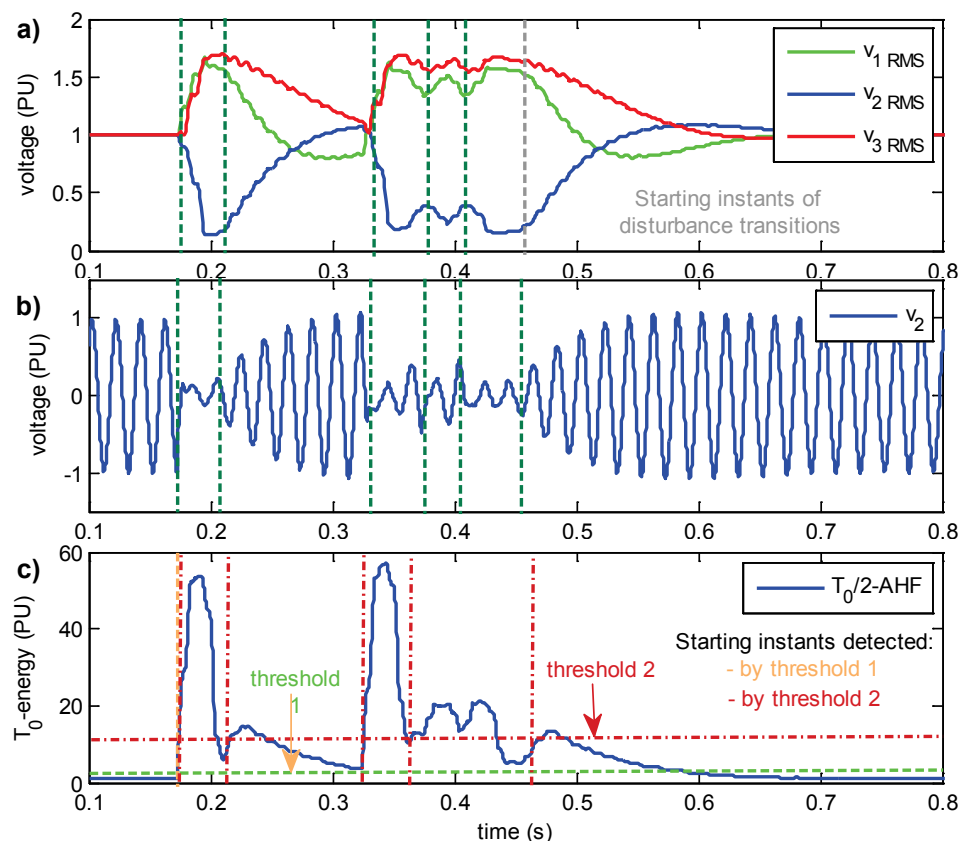


Figure 8-2 – Détection de transitoires proches par un seuillage statique

a) Valeurs efficaces des tensions pendant la perturbation      b) Forme d'onde de la phase en défaut  
c) Indice de segmentation et seuils statiques utilisés pour la détection des transitoires

### 8.3. Algorithme de détection adaptatif

Un algorithme de détection spécifique a été développé afin de pallier les problèmes rencontrés par le seuillage statique. La structure assurant son caractère adaptatif est composée de deux modules distincts qui analysent les indices de segmentation et identifient la présence des transitoires.

- Le 1<sup>er</sup> module adapte les seuils de détection aux variations locales de l'indice de segmentation. Contrairement au seuillage fixe, ce processus d'adaptation tient compte de la dynamique des indices de segmentation. Il est ainsi capable de détecter des transitions avant qu'un nouveau régime permanent soit atteint. Il tient également compte des variations du régime harmonique des formes d'onde.
- Le 2<sup>nd</sup> module est le centre de décision de l'algorithme de détection. Il détermine si les formes d'onde se trouvent dans un état transitoire en comparant, pour chaque voie de mesure, la valeur courante de l'indice de segmentation à celles des seuils de détection adaptatifs.

#### 8.3.1. Adaptation des seuils de détection

L'adaptation des seuils de détection aux indices de segmentation est réalisée en plusieurs étapes :

##### **Détermination d'un niveau de référence et normalisation du support**

Pour chaque indice de segmentation  $Index_i$ , un niveau de référence est déterminé à partir de leur comportement en régime de fonctionnement normal. Dans le cadre de l'étude d'un enregistrement, ce niveau est déterminé à partir du comportement moyen de l'indice de segmentation au cours du régime permanent du début de l'enregistrement. Pour une étude en temps-réel des formes d'onde mesurées, il est préalablement défini lors d'une phase d'initialisation, c'est-à-dire avant le début de l'analyse.

Ce niveau de référence permet de normaliser l'indice de segmentation analysé (8-1). Lorsqu'un support normalisé  $Index_{i\ norm}$  est considéré, le niveau de référence correspond au niveau unitaire (Figure 8-3). Cette normalisation est nécessaire car chaque forme d'onde présente un niveau de bruit et de perturbations harmoniques qui lui sont propres.

$$Index_{i\ norm}(t_k) = \frac{Index_i(t_k)}{\text{mean}_{t_j \in RP}(Index_i(t_j))} \quad (8-1)$$

##### **Définition des seuils de détection fixes**

Un couple de seuils de détection fixes ( $Threshold_{UD}$  et  $Threshold_{LD}$ ) est déterminé à partir du niveau de référence pour chaque indice de segmentation normalisé (8-2). Ces seuils constituent une hystérésis. Ils correspondent à la limite en dessous de laquelle on peut affirmer avec quasi-certitude que les formes d'onde sont en régime permanent. Ces seuils majorent le niveau de référence de

l'indice de segmentation. Leur définition nécessite la prise en compte des fluctuations de l'indice de segmentation dues aux perturbations permanentes de la forme d'onde (harmoniques et bruit). Dans l'expression (8-2), les termes  $\alpha_u$  et  $\alpha_l$  jouent le rôle de marges de sécurité vis-à-vis de telles perturbations.

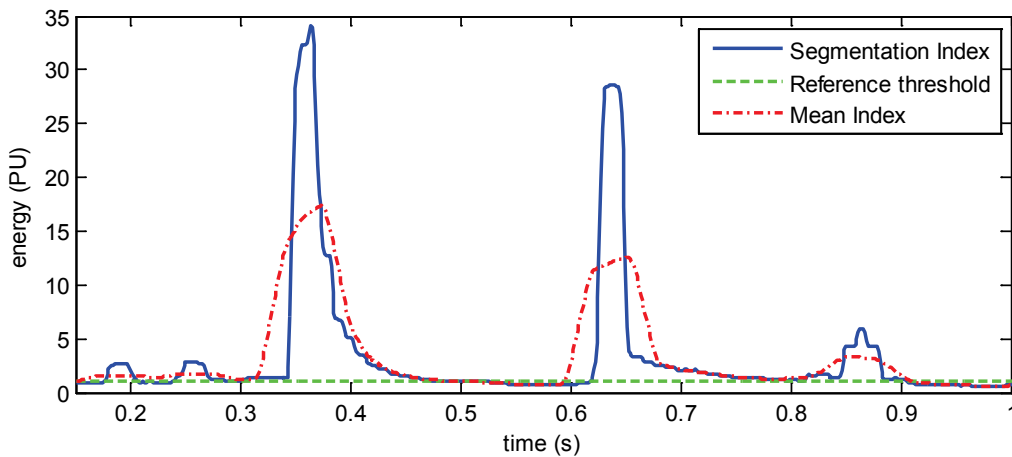
$$\begin{cases} Threshold_{Upper\ Detection} = 1 + \alpha_u \\ Threshold_{Lower\ Detection} = 1 + \alpha_l \end{cases} \quad \text{Avec : } \alpha_u > \alpha_l > 0 \quad (8-2)$$

### Evaluation de la grandeur d'adaptation

Pour assurer des performances de détection des transitoires optimales, les seuils de détection doivent suivre le comportement de l'indice de segmentation. A cet effet, une grandeur d'adaptation  $Q$  est définie. Elle est liée à la valeur moyenne de l'indice normalisé  $Index_{i\ norm}$  sur une fenêtre d'observation donnée (8-3). Cette grandeur sert de base au mécanisme d'adaptation de l'algorithme de détection (Figure 8-3).

$$Q = \underset{W}{mean}(Index_{i\ norm}) - 1 \quad \text{Où : } W \in [2T_0, 4T_0] \quad (8-3)$$

La fenêtre d'observation utilisée pour le calcul de la grandeur d'adaptation est anti-causale : elle est centrée sur l'instant de l'indice de segmentation à analyser. Sa taille  $W$  est prise entre 2 et 4 périodes  $T_0$  de la forme d'onde. Elle conditionne fortement la dynamique de l'algorithme de segmentation : l'utilisation d'une fenêtre réduite désensibilise la détection à la présence de perturbations permanentes mais limite également sa capacité à détecter des transitoires faiblement énergétiques. Des fenêtres de taille plus élevée diminuent par contre la résolution de l'algorithme puisque des perturbations rapprochées et de dynamiques différentes ne peuvent être dissociées.

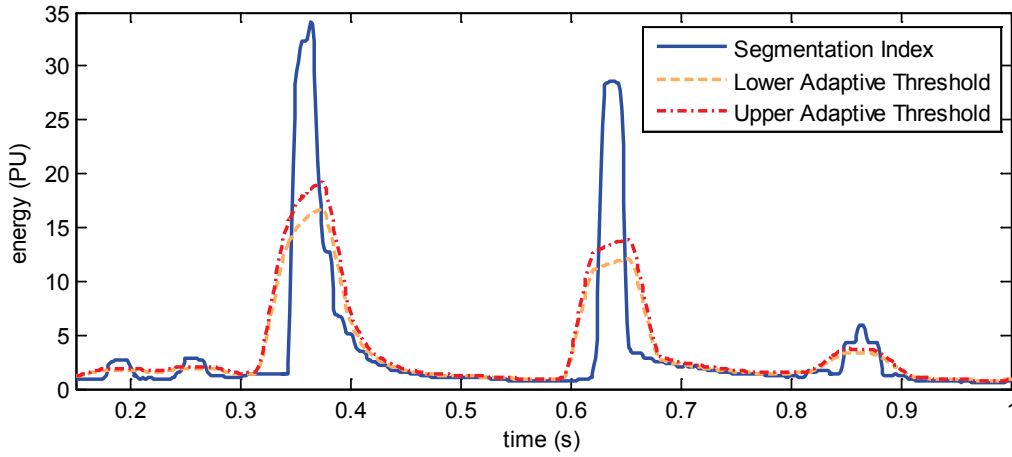


**Figure 8-3 – Illustration des étapes de normalisation du support et de calcul de sa moyenne**  
Perturbation de la Figure 7-10 ; indice de segmentation calculé par un  $T_0/2$ -AHF et avec  $T_{int} = T_0$

### Définition des seuils de détection adaptatifs

Les seuils adaptatifs ( $Threshold_{UA}$  et  $Threshold_{LA}$ ) utilisés pour la détection des transitoires sont définis à partir des grandeurs précédemment déterminées, à savoir les seuils de détection fixes et la grandeur d'adaptation  $Q$  (8-4). Comme les seuils de détection fixes, les seuils adaptatifs constituent une hystérésis (Figure 8-4). Son emploi permet de limiter le taux de sur-segmentation de l'algorithme. Cette hystérésis intervient en particulier lorsque l'indice de segmentation est proche d'un régime permanent ou que la forme d'onde comporte deux transitoires rapprochés.

$$\begin{cases} Threshold_{Upper Adaptive} = Threshold_{Upper Detection} + \beta_u Q \\ Threshold_{Lower Adaptive} = Threshold_{Lower Detection} + \beta_l Q \end{cases} \quad \text{Avec : } \beta_u > 1 > \beta_l \quad (8-4)$$



**Figure 8-4 – Illustration de l'étape de détermination des seuils adaptatifs**

Perturbation de la Figure 7-10 ; indice de segmentation calculé par un  $T_0/2$ -AHF et avec  $T_{int} = T_0$

### 8.3.2. Détection des transitoires

La détection des transitoires des perturbations utilise directement les seuils adaptatifs déterminés à partir de l'indice de segmentation. La règle de décision utilisée est très simple. Elle compare en continu le point courant de l'indice de segmentation avec les deux seuils adaptatifs (8-5). Le résultat de la comparaison permet de conclure sur la présence de régimes transitoires (Figure 8-5) :

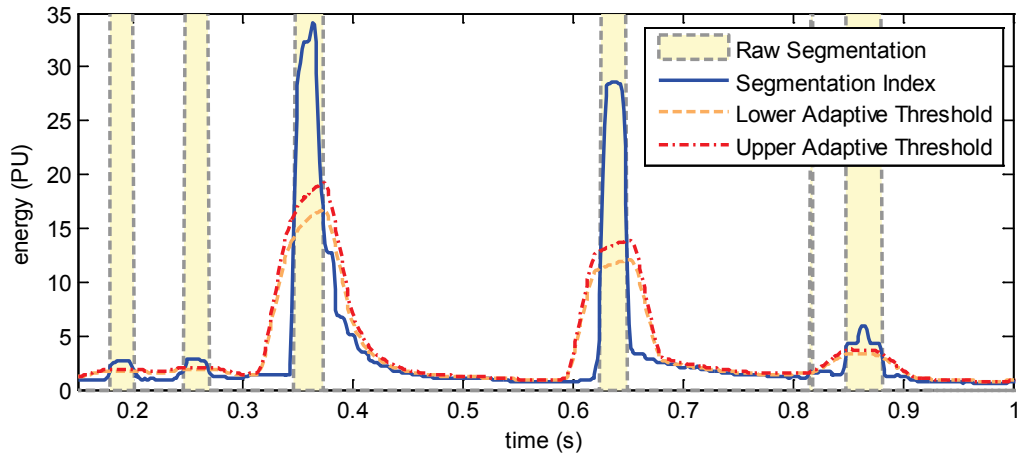
- ✓ Si la valeur de l'indice de segmentation est inférieure au seuil adaptatif bas, les formes d'onde sont considérées comme étant en régime permanent.
- ✓ Si sa valeur est supérieure au seuil haut, on considère les formes d'onde en régime transitoire.
- ✓ La présence de l'indice de segmentation dans la bande comprise entre ces deux seuils est interprétée différemment si un transitoire a été précédemment détecté. Elle ne modifie pas l'information sur le comportement des formes d'onde.
  - Les formes d'onde sont considérées en régime permanent tant que le seuil adaptatif haut n'est pas dépassé.



- Suite à la détection d'un transitoire, elles sont considérées comme tel tant que l'indice ne repasse pas sous le seuil adaptatif bas.

Cet effet mémoire assure une meilleure robustesse au procédé de segmentation.

$$\begin{cases} Index_{i\ norm}(t_k) > Threshold_{Upper\ Adaptive} , & \text{présence de transitoire} \\ Index_{i\ norm}(t_k) < Threshold_{Lower\ Adaptive} , & \text{régime permanent} \end{cases} \quad (8-5)$$



**Figure 8-5 – Décomposition de la forme d'onde en régimes permanents et transitoires**  
 Perturbation de la Figure 7-10 ; indice de segmentation calculé par un  $T_0/2$ -AHF et avec  $T_{int} = T_0$

## Chapitre 9 – Post-traitement de la décomposition

À la fin de l'étape de détection des transitoires, une décomposition des perturbations propre à chaque voie de mesure est déterminée par l'algorithme. Ces décompositions sont indépendantes et possèdent un retard de détection variable. C'est pourquoi elles ne peuvent être exploitées directement dans le cadre de l'identification et de la localisation des perturbations. Afin d'obtenir une segmentation unifiée et fiable des perturbations, on leur applique successivement deux traitements :

- Le premier module *compense le retard de la décomposition* déterminée par l'algorithme de détection. Il localise avec un maximum de précision les intervalles correspondant aux transitoires des perturbations et en particulier leurs instants d'apparition. Ce traitement facilite l'application des méthodes de reconnaissance et de direction et augmente de manière significative leur fiabilité [CAU10b].
- Le second module *rassemble les décompositions corrigées* de chaque voie de mesure en une décomposition unique, commune à l'ensemble des formes d'onde mesurées. Il uniformise l'analyse des perturbations : chaque forme d'onde est ensuite traitée de façon similaire par les étapes suivantes de caractérisation et de reconnaissance.

### 9.1. Compensation du retard de segmentation

#### 9.1.1. Origine du retard de segmentation

La décomposition déterminée par l'algorithme de détection présente un retard variable par rapport aux instants d'apparition réels des transitoires (Figure 9-1). Ce retard dépend de plusieurs facteurs propres à la perturbation, tels que son amplitude ou sa gamme de fréquences, mais il dépend également de facteurs liés à l'algorithme de segmentation, tels que la technique de filtrage employée, la largeur de la fenêtre d'observation de l'indice de segmentation...

#### 9.1.2. Intérêt de la compensation du retard de la décomposition

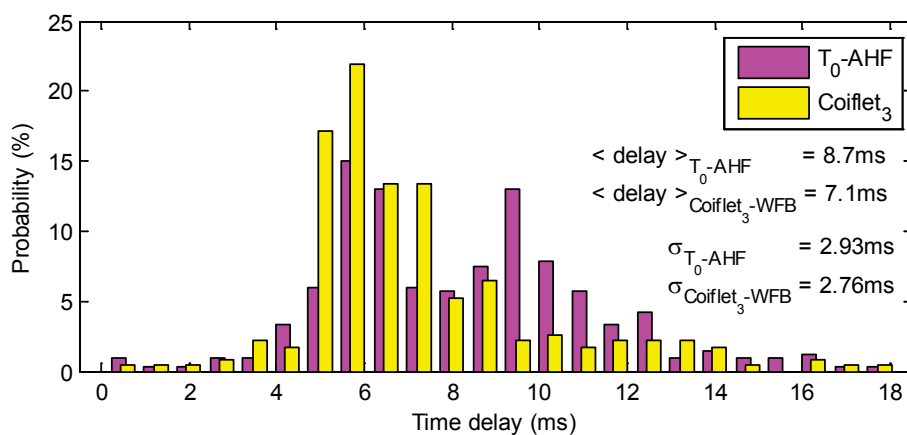
Si le champ d'applications du système développé se réduisait à la seule détection des perturbations, l'étape de compensation du retard ne présenterait aucun intérêt. Mais, dans notre cas, la décomposition des formes d'onde est utilisée au sein d'un processus d'analyse automatique et sert de base à la caractérisation et l'identification des perturbations.

Déterminer précisément les instants d'apparition des transitoires des perturbations constitue un enjeu

essentiel pour un tel système. L'extraction des informations contenues dans chaque régime de fonctionnement dépend directement de ce facteur. Cette dépendance est maximale lorsqu'on cherche à extraire des informations de leurs transitoires. Pour ce type d'intervalles, la majorité des informations est localisée dans les premiers instants suivant l'apparition du transitoire. Sans une estimation précise de cet instant, la fiabilité des informations déterminées est fortement réduite. Cette problématique est particulièrement sensible lors de la caractérisation d'événements tels que les enclenchements de batteries de condensateurs ou les défauts monophasés apparaissant sur les réseaux à neutre compensé. Les résultats de leur identification et leur localisation sont directement impactés [CAU11a].

Dans ces conditions, des contraintes supplémentaires sur la précision de la décomposition déterminée par l'algorithme de segmentation sont requises pour réaliser l'analyse automatique des formes d'onde des perturbations. On ne se contente plus d'évaluer la décomposition des perturbations uniquement sur des critères tels que les taux de détection et de sur-segmentation. Des quantificateurs supplémentaires, basés sur l'étude statistique du retard des segmentations obtenues, sont également pris en compte. La moyenne et l'écart-type du retard des décompositions ainsi que les taux de segmentations utilisables et erronées sont évalués à cette fin (§6.2).

La Figure 9-1 nous montre l'insuffisance de la décomposition brute fournie par l'algorithme de détection au regard de ces deux grandeurs : un retard moyen supérieur à 7 ms et une dispersion de 3 ms sont insuffisants pour garantir une extraction fiable des informations des transitoires. Afin d'améliorer les propriétés de la décomposition, un post-traitement corrigeant son retard moyen et réduisant son écart-type est appliqué.



**Figure 9-1 – Distribution du retard de détection. Deux indices de segmentation calculés par un  $T_0$ -AHF et par un WFB de type Coiflet<sub>3</sub> sont analysés par l'algorithme de détection**

La précision des méthodes de segmentation décomposant les régimes de fonctionnement des formes d'onde est une thématique peu abordée dans la littérature. A notre connaissance, seul l'auteur Le [LE10, LE11] tient compte de cette problématique essentielle. Il segmente successivement les formes d'onde de manière causale et anti-causale afin d'améliorer l'estimation temporelle des transitoires. Une telle démarche n'a pas été retenue car elle est inapplicable dans une problématique temps-réel.

### 9.1.3. Méthodes de compensation du retard

Diverses techniques sont employées afin de compenser le retard de la décomposition fournie par l'algorithme de détection. Nous en avons étudié et testé plusieurs catégories [CAU09]. Deux méthodes sont présentées dans ce mémoire : une méthode statistique et une méthode analytique.

#### 9.1.3.1. Compensation du retard moyen

##### Principe de la compensation

Cette méthode de compensation statistique corrige la décomposition déterminée par l'algorithme de détection à l'aide de l'estimation du retard moyen  $\langle \tau_{index} \rangle$  du processus de segmentation. Cette valeur moyenne est déterminée à partir de l'analyse des décompositions de perturbations appartenant à une importante base d'apprentissage. La différence entre le temps d'apparition du transitoire  $t_{apparition i}$  et son instant de détection  $t_{détection i}$  est évaluée pour chaque transitoire de la base puis moyennée sur l'ensemble des transitoires (9-1). On note que le temps d'apparition réel de chaque transitoire de la base est déterminé au préalable de manière visuelle.

$$\langle \tau_{index} \rangle = \text{moyenne}_{i=1 \dots N} (t_{détection i} - t_{apparition i}) \quad (9-1)$$

Avec :  $i$  le numéro du transitoire considéré

$N$  le nombre total de transitoires contenus dans la base d'apprentissage

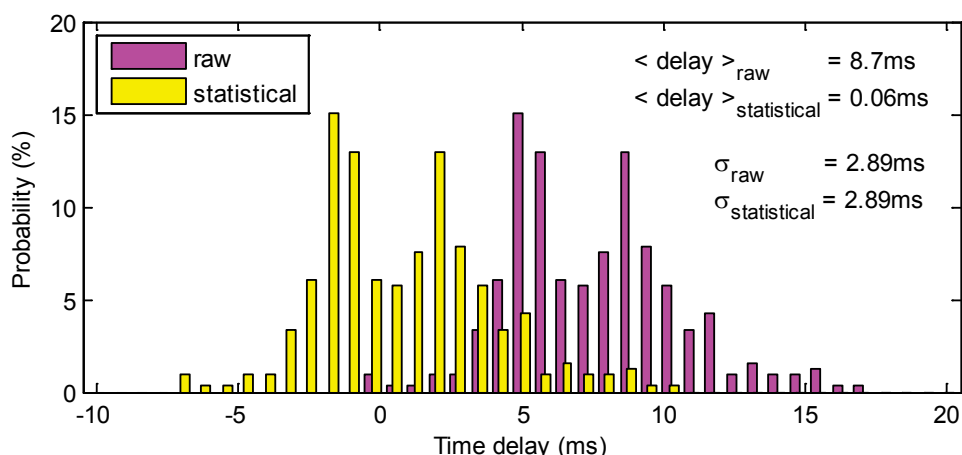
Les performances de cette méthode de compensation dépendent fortement de la base d'apprentissage utilisée. Celle employée dans ce manuscrit (§11.1) a été constituée de manière à être représentative des catégories de transitoires devant être détectées. Des types et des amplitudes d'événements différents y sont analysés afin de représenter au mieux la variabilité du retard de la segmentation. Ces précautions préalables permettent d'évaluer le retard moyen de la méthode de segmentation le plus justement.

Une valeur moyenne des retards de la méthode de segmentation  $\langle \tau_{index} \rangle$  est évaluée à l'issue de cet apprentissage. Elle est utilisée pour corriger la décomposition. Chaque fois qu'un transitoire est détecté, on applique à l'instant de détection  $t_{détection i}$  un décalage égal à cette valeur moyenne. La valeur obtenue  $t_{corrigé i}$  correspond à la valeur supposée de l'instant d'apparition du transitoire (9-2).

$$t_{corrigé i} = t_{détection i} - \langle \tau_{index} \rangle \quad (9-2)$$

##### Propriétés de la segmentation après correction

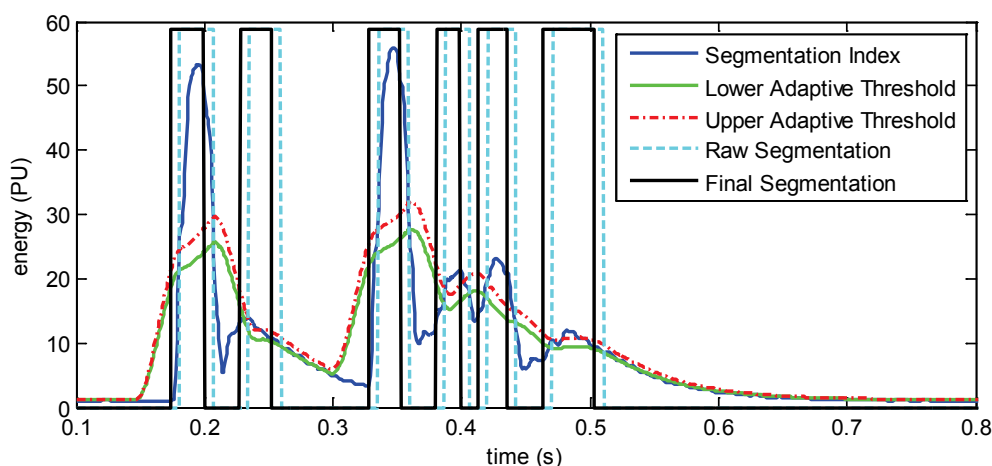
Cette méthode de compensation statistique du retard présente une très faible complexité algorithmique puisqu'elle se limite à appliquer un décalage constant aux instants de détection des transitoires. Elle présente toutefois un inconvénient majeur : si elle corrige efficacement la valeur moyenne des retards de segmentation, elle ne réduit pas leur écart-type. La précision de la décomposition n'est donc que partiellement améliorée (Figure 9-2).



**Figure 9-2 – Comparaison des distributions des retards avant (« raw ») et après correction du retard moyen (« statistical »)**

(Indice de segmentation calculé à partir d'un  $T_0$ -AHF et d'une fenêtre d'intégration égale à  $T_0$ )

Cette correction est partielle du fait qu'elle ne prend en compte, ni le contexte de la détection (perturbations permanentes et proximités d'autres transitoires), ni la dynamique des perturbations (durée du transitoire et énergie de la perturbation). En présence de transitoires proches et de perturbations de faibles amplitudes, l'erreur sur l'estimation de l'instant d'apparition est élevée (2<sup>nd</sup> transitoire de la Figure 9-3). De plus, la correction qu'elle réalise est limitée aux instants d'apparition des transitoires. Leurs instants de disparition ne sont pas réévalués car leur dispersion est beaucoup plus importante que celle des instants de détection. Elle est en effet très dépendante de la dynamique de la perturbation. Appliquée en continue, cette méthode n'améliore donc pas la résolution de l'algorithme et n'a aucun impact sur le taux de détection des transitoires.



**Figure 9-3 – Résultat de la compensation par la méthode de correction statistique**

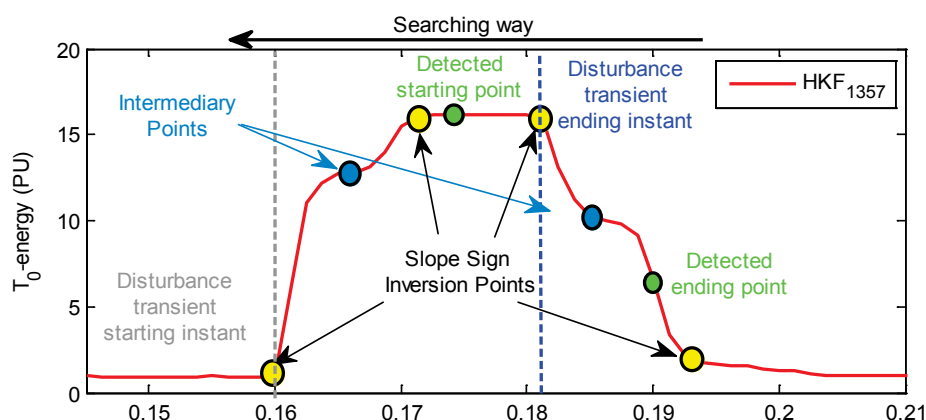
(Indice de segmentation calculé à partir d'un  $T_0/2$ -AHF pour la perturbation de la Figure 8-2)

### 9.1.3.2. Compensation analytique

Les méthodes statistiques compensant le retard de segmentation ont recours à une phase d'apprentissage au cours de laquelle leurs paramètres sont calibrés. Cette étape n'est pas requise par les méthodes de compensation géométrique. Ces méthodes utilisent les propriétés locales des indices de segmentation afin de corriger le retard variable de la segmentation. Elles ont l'avantage de compenser le retard moyen et d'améliorer l'écart-type de l'erreur de segmentation.

#### Principe de la compensation géométrique

Les méthodes de compensation géométrique exploitent le comportement spécifique de l'indice de segmentation au cours des transitoires des perturbations. Différents points caractéristiques peuvent être identifiés sur ces indices à la suite de changements d'état du réseau. Ces points sont porteurs d'informations sur les instants de début et de fin des transitoires des perturbations, telles que les défauts ou les enclenchements de batteries de condensateurs de compensation (Figure 9-4). Les méthodes de compensation géométrique emploient différents artifices pour estimer les instants correspondant à ces points.



**Figure 9-4 – Principe de la méthode de compensation exploitant les points d'inversion de la pente de l'indice de segmentation (1<sup>er</sup> transitoire de la perturbation de la Figure 6-1)**

Pour déterminer l'instant d'apparition du transitoire, une possibilité consiste à exploiter le comportement quasi-linéaire de l'indice de segmentation au cours des instants suivant le début du transitoire [CAU09]. Cette méthode est peu coûteuse mais elle présente plusieurs limitations. L'hypothèse de linéarité sur laquelle elle repose n'est pas vérifiée pour des détections trop tardives ou en présence de transitoires trop rapprochés. Le 2<sup>nd</sup> transitoire de la Figure 9-3 illustre une telle situation. L'extension de ce principe à la localisation de la fin du transitoire est également délicate en raison de leur plus grande dispersion.

Une alternative consiste à explorer la zone précédant la détection d'un transitoire afin d'y trouver les points auxquels le signe de la pente de l'indice de segmentation s'inverse. Ces points sont désignés dans ce manuscrit par le terme de « points d'inversion » (ou « slope sign inversion points »). (Figure

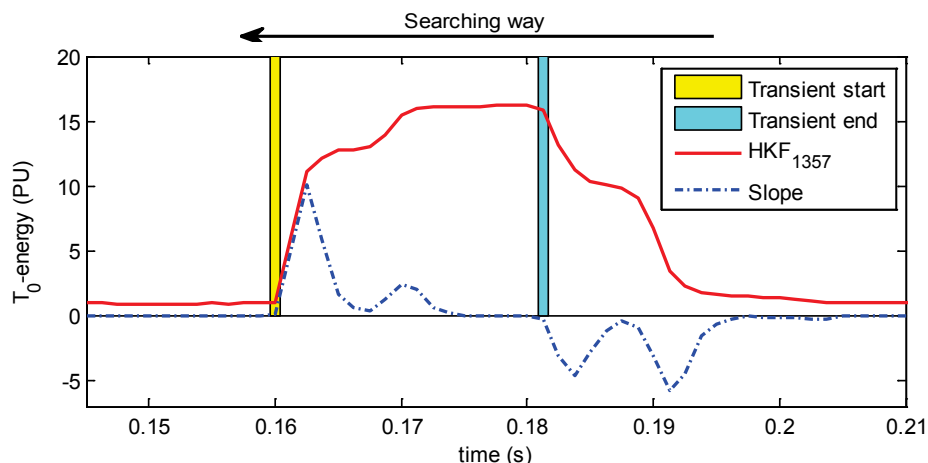
9-4). Ils sont recherchés par la méthode de compensation du retard retenue au sein de notre procédé de segmentation.

### **Mise en œuvre de la méthode d'analyse des points d'inversion**

Les points d'inversion sont caractérisés par un changement de signe de la pente de l'indice de segmentation ou par son annulation. Certains d'entre eux correspondent aux instants d'apparition et de disparition du transitoire de la perturbation. Ce sont ces points qui sont recherchés et utilisés par la méthode de compensation.

La méthode de compensation recherchant les points d'inversion procède à une analyse différenciée de la pente de l'indice de segmentation. Les critères de décision sont adaptés selon qu'un début ou une fin d'un régime transitoire est signalé par le procédé de décomposition (Figure 9-5).

- Si le début d'un transitoire est détecté, la méthode recherche les points d'inversion caractérisés par une transition d'un gradient positif vers un gradient nul ou négatif. Le premier point rencontré vérifiant ces conditions fournit une bonne approximation de l'instant d'apparition de ce transitoire.
- Si la fin d'un transitoire est détectée, un principe similaire est appliqué : le premier point d'inversion rencontré caractérisé par le passage d'un gradient négatif vers un gradient nul ou positif fournit une approximation de la fin de ce transitoire.



**Figure 9-5 – Pente de l'indice de segmentation et localisation des instants de début et de fin du transitoire à partir de ses points d'inversion**

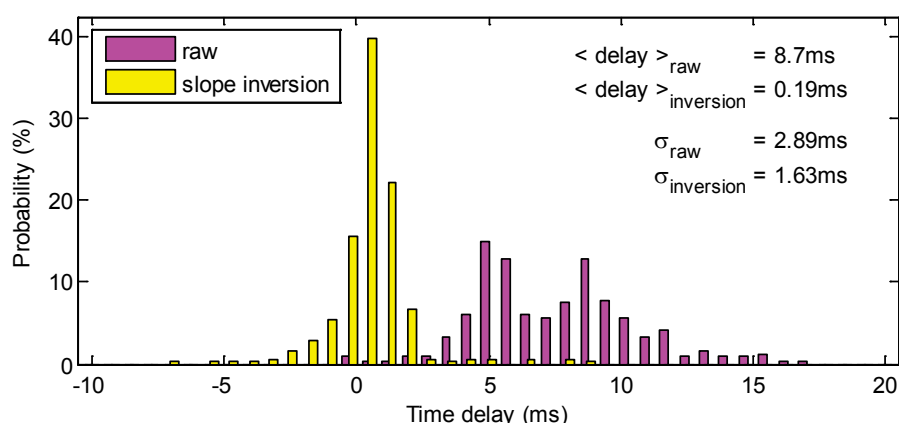
Dans certaines conditions, des points d'inversion intermédiaires viennent parasiter la bonne localisation des instants d'apparition et de disparition des perturbations (Figure 9-4). Une manière aisée de s'affranchir de ces points consiste à poursuivre très localement la recherche des points d'inversion. On profite de la poursuite du comportement croissant (ou décroissant) de l'indice de segmentation après ces points. Si cette recherche n'aboutit pas à la détection d'un nouveau point valable, le point initial est conservé. Sinon, c'est le second point qui est utilisé.

### **Propriétés de la segmentation corrigée par la méthode d'analyse des points d'inversion**

Cette méthode présente d'excellentes caractéristiques en robustesse et stabilité. Le nombre d'évaluations erronées est fortement réduit car elle s'affranchit largement des hypothèses locales formulées sur l'indice de segmentation (comportement linéaire). Elle s'adapte également au contexte de la perturbation et traite de manière similaire des perturbations très et peu énergétiques. Ces bonnes performances sont conservées même en présence de perturbations non classiques : la segmentation corrigée obtenue pour le 2<sup>nd</sup> transitoire de la Figure 9-7 est à comparer à celle de la Figure 9-3.

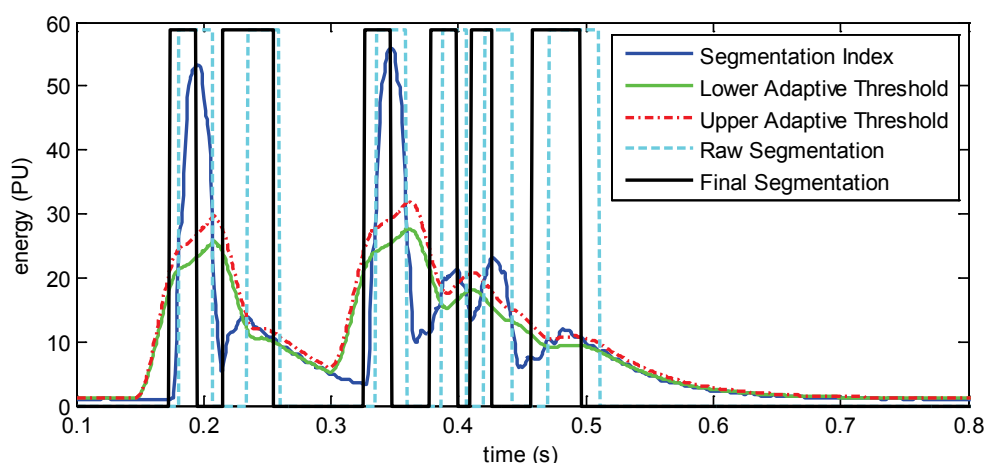
La moyenne et l'écart-type du retard des segmentations s'en trouvent améliorés (Figure 9-6).

Contrairement aux autres méthodes statistiques et analytiques, elle réévalue les instants d'apparition et de disparition des transitoires. Des transitoires plus proches sont ainsi détectés par le procédé de segmentation. Cette propriété augmente fortement sa capacité de détection ainsi que sa résolution.



**Figure 9-6 – Comparaison des distributions des retards avant (« raw ») et après l'analyse des points d'inversion (« slope inversion »)**

(Indice de segmentation calculé à partir d'un  $T_0$ -AHF et d'une fenêtre d'intégration égale à  $T_0$ )



**Figure 9-7 – Résultat de la compensation par la méthode d'analyse des points d'inflexion**

(Indice de segmentation calculé à partir d'un  $T_0/2$ -AHF pour la perturbation de la Figure 8-2)



La méthode de compensation du retard par analyse des points d'inversion est par contre plus complexe à mettre en œuvre que les autres méthodes de compensation. Elle réalise une exploration de l'indice de segmentation sur les instants précédant l'apparition (ou la disparition) de chaque transitoire alors que les autres méthodes se contentent d'une évaluation ponctuelle ou d'une grandeur pré-calculée. Son coût calculatoire reste toutefois suffisamment faible pour l'appliquer en continu afin de segmenter et d'analyser en temps-réel les perturbations.

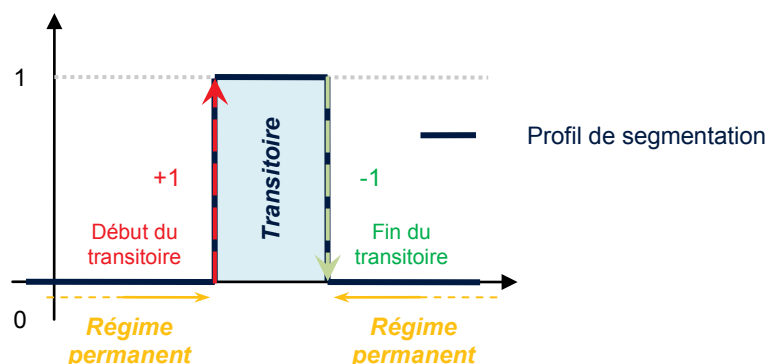
### 9.2. Fusion des segmentations

À la fin des étapes de détection des transitoires et de compensation du retard, chaque forme d'onde des tensions et des courants possède une décomposition propre et précise résultant de son analyse indépendante. Si les décompositions obtenues sont globalement proches, elles diffèrent selon le type et l'amplitude de la perturbation : dans certains cas, toutes les phases des systèmes des tensions et des courants ne sont pas perturbées. Les décompositions issues de l'analyse des six formes d'onde ne peuvent donc être exploitées comme telles par l'étape de reconnaissance (Figure 3-6).

L'étape de fusion est la dernière étape du procédé de segmentation des formes d'onde. Elle assure le regroupement de chacune des décompositions en une segmentation unique reflétant les régimes de fonctionnement observés sur chaque forme d'onde.

#### Profils de segmentation

Le système de fusion repose sur des règles de décision qui analysent le nombre de décompositions signalant la présence d'un régime transitoire au même instant. Pour en faciliter l'emploi, on détermine au préalable un « profil de segmentation » à partir de la décomposition de chaque forme d'onde. Ce profil est une fonction en escalier prenant la valeur unité pendant les régimes transitoires des perturbations et la valeur nulle au cours des régimes permanents (Figure 9-8).

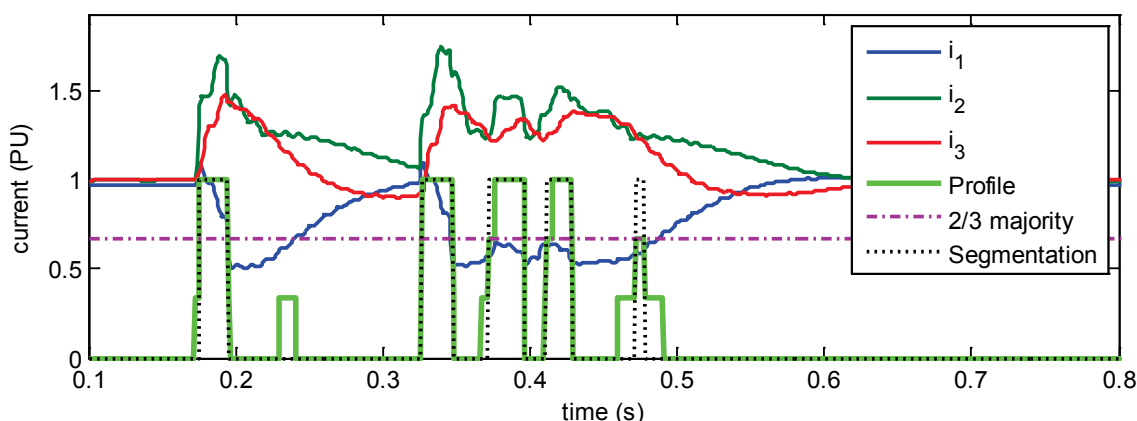


**Figure 9-8 – Décomposition des formes d'onde et profil de segmentation**

#### Règles de décision majoritaire

Avant d'être utilisés par une règle de décision, les profils de chaque forme d'onde sont additionnés (Figure 9-9). L'information obtenue à l'issue de cette opération renseigne directement sur le nombre

de voies de mesure se trouvant en régime transitoire à chaque instant. Elle facilite l'application d'une règle de décision majoritaire car elle se contente d'analyser le niveau du profil rassemblé à chaque instant. Lorsque celui-ci est égal ou dépasse la valeur correspondant au niveau majoritaire, la segmentation résultante considère que les formes d'onde sont en régime transitoire. Dans le cas contraire, elle les considère en régime permanent. La segmentation correspondant à la fusion des informations des profils est ensuite obtenue de manière immédiate.

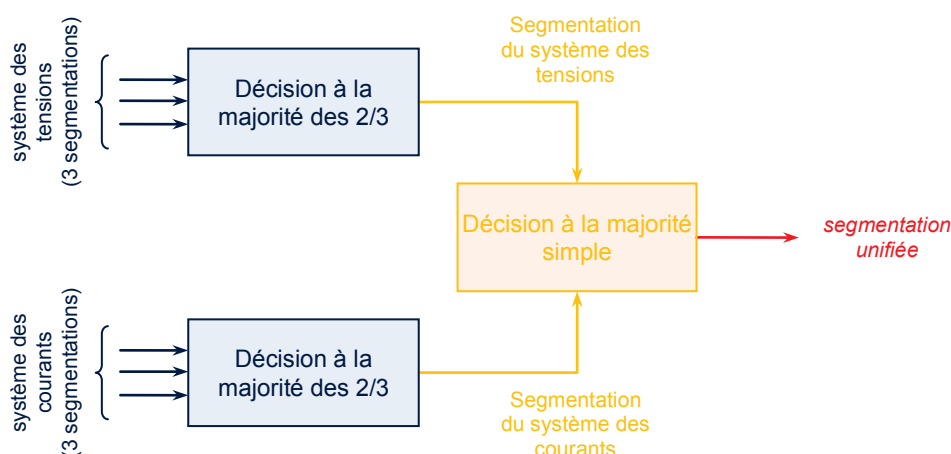


**Figure 9-9 – Addition de trois profils de segmentation et segmentation unifiée résultante**  
(Perturbation de la Figure 8-2)

### Système de fusion des segmentations

La fusion des segmentations est assurée par un système de décision majoritaire à deux niveaux (Figure 9-10). A chaque niveau, une règle de décision différente est utilisée.

- ✓ Au cours du premier niveau, les systèmes des tensions et des courants sont traités séparément. Pour chacun d'eux, les trois segmentations déterminées par l'algorithme de détection et le procédé de correction sont regroupées en une unique segmentation. Une règle de décision à la majorité des 2/3 leur est appliquée. Elle impose qu'un transitoire soit détecté au même instant sur au moins deux des trois formes d'onde du système considéré.
- ✓ Le second niveau de décision utilise les segmentations rassemblées du système triphasé de tension et de celui de courant afin de déterminer une segmentation unifiée pour l'ensemble des formes d'onde. Il emploie une règle de décision à la majorité simple pour fusionner ces deux segmentations. Il suffit que la segmentation d'un des systèmes indique la présence d'un transitoire pour qu'elle soit répercutée à l'ensemble des formes d'onde de tensions et de courants.



**Figure 9-10 – Schéma du système de fusion des segmentations**

L'emploi de cette structure décisionnelle améliore fortement le taux de sur-segmentation, c'est-à-dire le taux de fausses alarmes. Les détections erronées dues à des artefacts sur l'un des indices de segmentation ne sont pas transmises à la segmentation finale grâce au premier niveau de décision.

Cette architecture répond à une réalité physique en analysant de manière séparée les deux systèmes triphasés. Les informations de segmentation fournies par le premier niveau pourraient ainsi être utilisées par le système de reconnaissance pour discriminer certains types de perturbations. Par exemple, pour le raccordement d'une charge, les formes d'onde des courants sont fortement impactées tandis que celles des tensions sont laissées quasi-inchangées.

Elle entraîne, par contre, une faible diminution de la capacité de détection du procédé de segmentation : un transitoire détecté sur une seule forme d'onde n'est pas répercuté sur la décomposition finale. Une telle situation reste toutefois marginale dans le cas d'un système triphasé en raison de l'interaction entre ses phases. On choisit de la négliger puisque la diminution de la capacité de détection est largement compensée par l'amélioration du taux de fausses détections de l'algorithme.

***Remarque 3 : Fusion des segmentations issues de l'analyse multi-résolution des perturbations***

Une structure de fusion des segmentations plus complexe est utilisée lorsque les niveaux de détails fournis par l'analyse multi-résolution des formes d'onde sont étudiés. Chaque forme d'onde est alors caractérisée par autant de segmentations indépendantes que de niveaux de décomposition du signal. La structure développée à cet effet est présentée dans l'article [CAU11c].

## Chapitre 10 – Segmentation « événementielle »

### 10.1. Principe de la segmentation événementielle

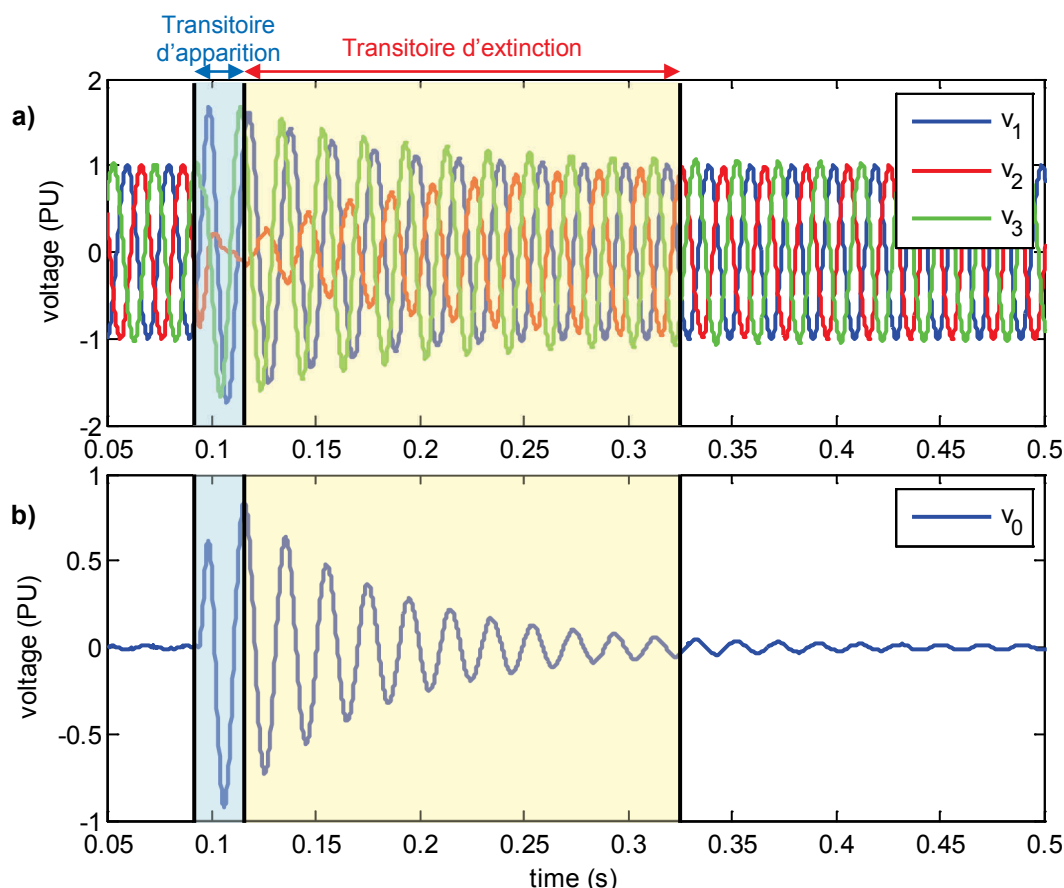
Le procédé de segmentation adaptatif présenté au cours des chapitres précédents décompose les formes d'onde en leurs régimes transitoires et permanents successifs. Bien que performant, il est mis en défaut dans une situation particulière : de par sa conception, il est incapable de distinguer deux régimes transitoires successifs. Cette caractéristique n'est problématique que pour les défauts monophasés apparaissant sur les réseaux à neutre compensé. Certains de ces défauts – notamment les défauts auto-extincteurs ou réamorçants – ne peuvent être décomposés en séries de régimes permanents et transitoires [BER95].

La méthode de segmentation événementielle présentée dans ce chapitre vient compléter ce procédé. Elle est dédiée à la décomposition de cette catégorie de défauts. Cette « exclusivité » est assurée par une 1<sup>re</sup> étape de reconnaissance qui teste le type de la perturbation détectée avant de réaliser cette méthode. Elle est effectuée uniquement si la vraisemblance de l'évènement est suffisante (Figure 4-1). L'intégration de cette méthode de segmentation au sein du schéma du système de reconnaissance global est traitée au Chapitre 17.

Cette caractéristique explique la dénomination « événementielle » de la méthode développée pour décomposer ces défauts : ce terme signale qu'elle intervient uniquement à la suite de la détection d'un défaut monophasé sur un réseau à neutre compensé.

Deux particularités doivent être considérées lors de la décomposition de cette catégorie de défauts :

- ✓ Selon que le défaut est permanent (Figure 10-4) ou auto-extincteur (Figure 10-1), les régimes d'apparition et d'extinction du défaut sont séparés ou non par un régime permanent. Si le défaut est réamorçant (Figure 10-3), les transitoires d'extinction sont également interrompus avant qu'un nouveau régime permanent soit atteint.
- ✓ La dynamique des transitoires d'apparition et d'extinction est différente. Le 1<sup>er</sup> type de transitoires présente une variation marquée et de courte durée tandis que le 2<sup>nd</sup> type est plus progressif. La Figure 10-1 illustre ces différences. Du fait de cette caractéristique, le transitoire d'extinction des perturbations a tendance à être masqué par celui d'apparition lorsque les transitoires sont proches. A la Figure 8-2, malgré le faible temps de réponse de l'indice de segmentation utilisé par le procédé de segmentation adaptatif, le 2<sup>nd</sup> transitoire est difficilement décelable bien qu'un court régime permanent le sépare du premier. L'indice de segmentation utilisé par la méthode événementielle ne doit pas être affecté par une telle problématique.



**Figure 10-1 – Exemple de défaut monophasé auto-extincteur observé sur un réseau compensé**

(a) Formes d'onde des 3 tensions simples

(b) Tension homopolaire

## 10.2. Objectifs du procédé de segmentation

### Expression des objectifs

Les transitoires des défauts monophasés sont porteurs d'un grand nombre d'informations sur la perturbation mesurée. L'extraction des informations contenues dans leurs transitoires de durée et de dynamique variables requiert une décomposition efficace et précise de leurs différentes phases.

Afin d'évaluer les performances de la méthode de segmentation événementielle, nous utilisons les grandeurs de fiabilité et de précision définies au Chapitre 6, c'est-à-dire le taux de détection, le taux de sur-segmentation, la valeur moyenne du retard de segmentation et son écart-type. Les taux de segmentation utilisable  $\tau_{usable}$  et inexploitable  $\tau_{false}$  sont également considérés

### Quantification des objectifs

La décomposition fiable des transitoires d'apparition et d'extinction ainsi que des régimes permanents de ces défauts est essentielle. Si deux transitoires successifs ne sont pas correctement divisés, une partie des caractéristiques déterminées lors de la phase de caractérisation est nécessairement

erronée. L'influence des taux de détection ( $\tau_{détection}$ ) et de sur-segmentation ( $\tau_{erreur}$ ) sur la reconnaissance est toutefois difficile à quantifier. Pour limiter leur impact, on impose au procédé de segmentation événementielle des contraintes similaires à celles de la segmentation adaptative. Il doit décomposer les formes d'onde avec un taux de détection des régimes de fonctionnement supérieur à 99% ( $\tau_{détection} > 99\%$ ) et un taux de sur-segmentations inférieur à 5% ( $\tau_{erreur} < 5\%$ ) pour l'ensemble des perturbations recherchées.

Des contraintes sur la précision de la segmentation sont également définies. Elles portent essentiellement sur les instants d'apparition des différents régimes de fonctionnement, qu'ils soient permanents ou transitoires. L'évaluation précise de leur fin est moins importante. En effet, pour les défauts auto-extincteurs et réamorçants, la fin du transitoire d'apparition correspond au début de celui d'extinction. De même, la fin du transitoire d'extinction d'un défaut réamorçant correspond au début du transitoire d'apparition suivant. Dans les autres cas, les transitoires se soldent par un retour progressif à un état permanent. Comme l'essentiel des informations se trouve dans les premiers instants du transitoire, ne pas considérer le transitoire dans sa totalité impacte peu les caractéristiques extraites de la perturbation.

L'analyse des indicateurs utilisés pour extraire les caractéristiques de cette catégorie de perturbations a permis d'identifier les contraintes de précision suivantes :

- ✓ Pour les instants indiquant le début des transitoires d'apparition des défauts, l'écart-type de l'erreur de segmentation doit être inférieur à 1 ms pour que l'erreur sur les indicateurs issus de la caractérisation soit inférieure à 10%. Cette valeur est indépendante du type de défauts monophasés. Elle dépend par contre de la dynamique du transitoire : plus celui-ci est court, plus la précision requise augmente. Cette valeur de 1 ms a été déterminée pour des régimes transitoires dont la durée est supérieure à 15 ms.
- ✓ Pour les instants indiquant le début des transitoires d'extinction, les contraintes sur la précision de la segmentation sont variables.
  - La précision requise pour détecter le début des transitoires d'extinction est globalement plus réduite dans le cas des défauts auto-extincteurs (Figure 10-1) et permanents (Figure 10-4), en raison de leur dynamique plus lente et de leur durée plus importante.
  - Pour les défauts monophasés réamorçants (Figure 10-3), la précision nécessaire est équivalente à celle des transitoires d'apparition, soit 1 ms. Ceci s'explique essentiellement par leur durée plus limitée qui est due à leur interruption par le transitoire d'apparition suivant.

La situation la plus contraignante étant utilisée pour conditionner la précision de la méthode de segmentation événementielle, son retard moyen  $m_r$  doit être nul et son écart-type  $e_r$  doit être inférieur à 0,5 ms.

Les contraintes sur les taux  $\tau_{usable}$  et  $\tau_{false}$  sont, par contre, moins spécifiques. On se fixe comme objectifs  $\tau_{usable} > 97,5\%$  et  $\tau_{false} < 0,5\%$  pour garantir au système de reconnaissance un niveau de performances suffisant.

### 10.3. Architecture du procédé de segmentation événementielle

Le procédé de segmentation événementielle présenté dans ce manuscrit a été développé pour répondre aux objectifs de fiabilité et de précision exposés au paragraphe précédent. Il exploite les formes d'onde des trois tensions simples mesurées sur le réseau pour décomposer les défauts monophasés en leurs régimes de fonctionnement successifs. Sa structure, qui comporte trois étapes principales, est présentée à la Figure 10-2.

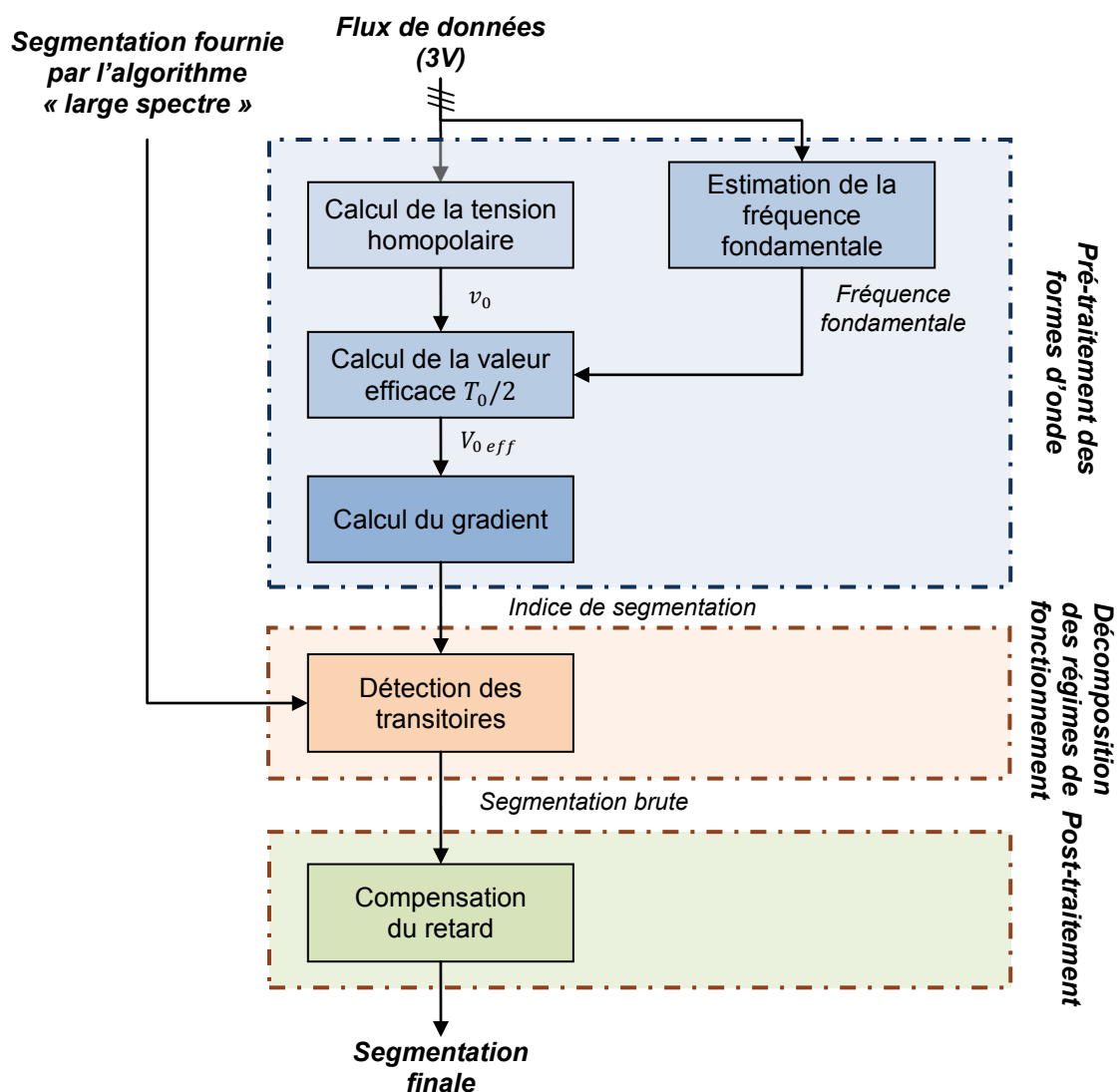


Figure 10-2 – Architecture du procédé d'identification des régimes de fonctionnement

### 1. Pré-traitement des formes d'onde

L'étape de *pré-traitement* traite les formes d'onde des tensions afin de décomposer les défauts monophasés affectant les réseaux à neutre compensé en leurs régimes de fonctionnement successifs. Elle détermine l'« *indice de segmentation* » qui est utilisé par l'algorithme de détection pour les identifier.

### 2. Décomposition des régimes de fonctionnement

L'étape de *détection des transitoires* analyse l'indice de segmentation pour distinguer les transitoires d'apparition, d'extinction et les régimes permanents des défauts monophasés. Dans cette méthode, des seuils de détection fixes sont utilisés pour la prise de décision. A la fin de cette étape, une décomposition commune à l'ensemble des formes d'onde mesurées sur le réseau est obtenue.

### 3. Post-traitement de la décomposition

L'étape de *post-traitement* de la décomposition a essentiellement pour tâche de compenser le retard de détection associé à chaque segment et ainsi d'améliorer la localisation des instants de début des transitoires d'apparition et d'extinction des défauts monophasés.

## 10.4. Pré-traitement des formes d'onde

### 10.4.1. Calcul de la valeur efficace de la tension homopolaire

#### Sélection de la grandeur d'analyse

Pour faciliter la distinction des régimes d'apparition et d'extinction des défauts monophasés, la grandeur analysée par le procédé de segmentation événementielle doit présenter un comportement caractéristique de leurs transitoires. Elle doit également être indépendante de l'origine du défaut par rapport au point de mesure. On ne cherche pas ici à caractériser la perturbation mais à séparer ses transitoires d'apparition et d'extinction.

On avait d'abord songé à exploiter la puissance homopolaire. Cette grandeur est utilisée dans les postes sources par les systèmes de protection wattmétrique homopolaire (PWH) pour déterminer le départ en défaut [BER98]. Mais la variation sur le courant résiduel n'est pas significative en présence de défauts monophasés localisés en amont du point de mesure, en particulier au niveau des clients HTA. Le comportement de la puissance homopolaire devient inexploitable dans ces conditions.

On choisit plutôt d'analyser la valeur efficace de la tension homopolaire. En présence de défauts monophasés, cette grandeur présente des variations significatives et spécifiques de leurs régimes de fonctionnement. Ces variations sont identiques quelle que soit la position du défaut sur le réseau. Cette grandeur présente aussi un autre avantage : elle évolue dans une plage de variations bien



délimitée. Comme son amplitude maximum ne dépasse pas la valeur de la tension nominale du réseau, elle est *facilement normalisable*.

### Calcul de la valeur efficace de la tension homopolaire

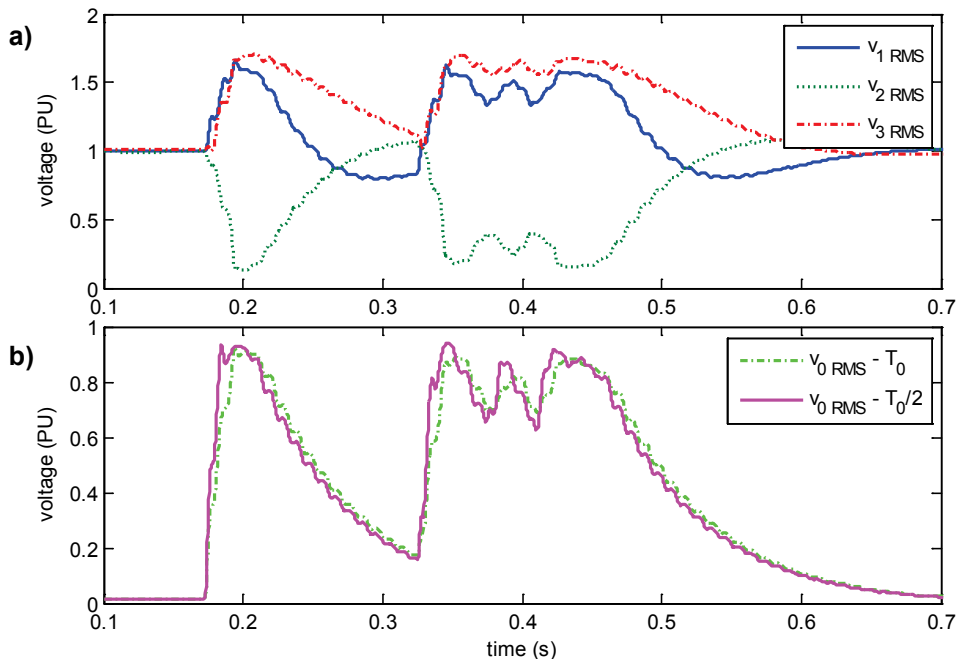
La valeur efficace de la tension homopolaire  $V_0$  est déterminée à partir de la tension homopolaire instantanée  $v_0$ . Cette tension est soit calculée à partir des formes d'onde des trois tensions simples mesurées sur le réseau, soit directement mesurée sur le réseau.

Sa valeur efficace est déterminée à l'aide de la formule (10-1). Du fait de la proximité des transitoires des défauts monophasés, le temps de réponse de la méthode la calculant doit être le plus faible possible. On choisit d'utiliser, comme base d'intégration, une fenêtre de taille réduite ( $T_{int} = T_0/2$ ) (Figure 10-3–b). Le module d'estimation de la fréquence fondamentale déterminant  $T_0$  (Figure 10-2) est identique à celui employé par le procédé de la segmentation adaptative (§7.2, Figure 6-2).

$$V_0(t_k) = \sqrt{\frac{1}{T_{int}} \sum_{i=-T_{int}/2}^{T_{int}/2} v_0(t_{k+i})} \quad (10-1)$$

La Figure 10-3-b illustre le comportement de la valeur efficace de la tension homopolaire ainsi calculée en présence de défauts réamorçants.

- ✓ Les variations positives de la tension homopolaire correspondent aux transitoires d'apparition,
- ✓ Ses variations négatives signalent leurs transitoires d'extinction,
- ✓ Les intervalles constants correspondent à leurs régimes permanents.



**Figure 10-3 –Comportement de la tension homopolaire pour deux fenêtres d'observation ( $T_{obs} = T_0$  et  $T_{obs} = T_0/2$ ) en présence d'un défaut réamorçant**

**a) Valeurs efficaces des tensions simples ( $T_{obs} = T_0$ )      b) Valeurs efficaces de la tension homopolaire**

### Remarque 4 : Sensibilité et comportement en présence d'autres perturbations

On note que cette fenêtre réduite rend l'estimation de la valeur efficace sensible aux harmoniques de rangs pairs [WAN04] : en leur présence, une oscillation régulière est observée en régime permanent. Un phénomène similaire est observé en présence d'une composante continue dans la forme d'onde. Ces caractéristiques n'impactent toutefois pas la méthode utilisée puisque ces composantes n'apparaissent pas dans la tension homopolaire au cours des transitoires des défauts monophasés.

En présence d'autres perturbations transitoires (enclenchements de batteries de condensateurs et de départs), la tension homopolaire n'est pas impactée puisqu'il n'y a pas de contact à la terre : elle reste à une valeur constante proche de zéro. Pour les défauts bi- et triphasés à la terre, le comportement de la tension homopolaire est similaire à celui observé en présence de défauts monophasés. L'amplitude des variations est, par contre, plus réduite et leur amortissement plus important. La méthode de segmentation événementielle proposée dans ce chapitre est donc également applicable à ces deux catégories de défauts. Son emploi ne présente toutefois aucun intérêt puisque leur dynamique peut être traitée par la méthode de segmentation adaptative.

Quoi qu'il en soit, l'étape de reconnaissance préalable à la réalisation de cette étape de segmentation est censée filtrer ces perturbations et ne pas déclencher cette méthode en leur présence.

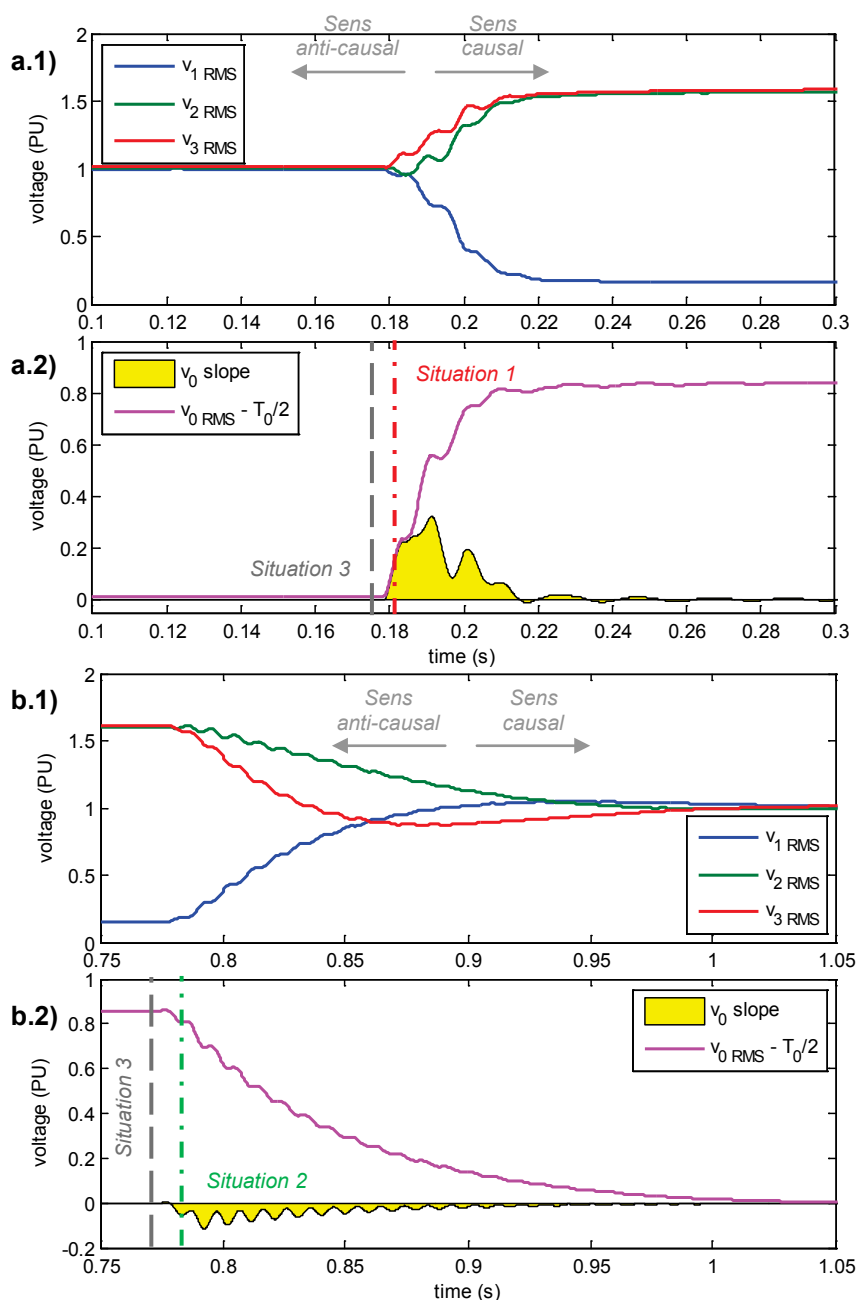
### **10.4.2. Calcul du gradient**

Si le comportement de la valeur efficace de la tension homopolaire est riche en informations, il est difficilement exploitable tel quel. Pour faciliter son analyse, son gradient est localement calculé. A cet effet, une fenêtre glissante de taille égale à  $T_0/8$  est utilisée. Elle induit un effet de lissage qui diminue le taux de fausses détections de l'algorithme, mais qui réduit en contrepartie sa résolution, c'est-à-dire sa capacité à détecter des transitoires proches. Dans ces conditions, des transitoires d'apparition et d'extinction distants de moins d'une demi-période ( $T_0/2$ ) ne sont pas séparables.

La grandeur obtenue à l'issue du calcul du gradient présente plusieurs avantages.

- ✓ Elle sépare clairement les transitoires d'apparition de ceux d'extinction : les premiers sont caractérisés par des valeurs de gradient positives (Figure 10-4-a) et les seconds par des valeurs négatives (Figure 10-4-b).
- ✓ Elle est algorithmiquement peu complexe à déterminer.

Cette grandeur est utilisée comme « indice de segmentation » par le processus de segmentation événementielle, c'est-à-dire qu'elle est analysée pour distinguer les régimes de fonctionnement des défauts monophasés.



**Figure 10-4 – Comportement de l'indicateur en présence des transitoires d'apparition (a) et de disparition (b) d'un défaut monophasé permanent sur un réseau compensé**

(a.1)&(b.1) valeurs efficaces des tensions simples ; (a.2)&(b.2) valeur efficace de la tension homopolaire

## 10.5. Procédé de décomposition

La méthode de segmentation événementielle développée pour décomposer les régimes de fonctionnement des défauts monophasés se fonde sur deux éléments :

- ✓ la décomposition des formes d'onde fournie par le procédé de segmentation adaptatif,
- ✓ l'analyse de l'indice de segmentation calculé à partir de la tension homopolaire.

On rappelle que ce procédé de segmentation n'est effectué que si la 1<sup>re</sup> étape d'identification du système de reconnaissance a préalablement signalé la présence d'un défaut monophasé. Cette information est exploitée implicitement par la méthode de décomposition.

### **Facteurs d'ajustement des seuils de détection**

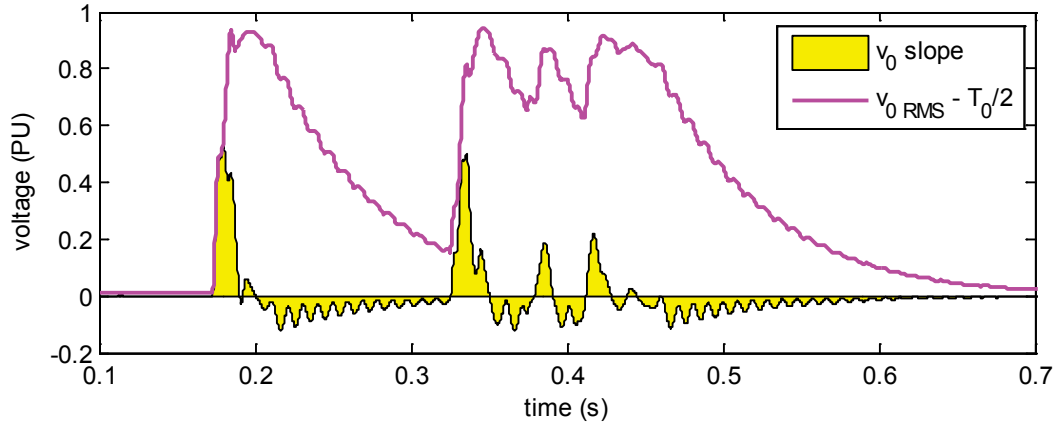
Le procédé de décomposition des défauts monophasés exploite le comportement spécifique de la tension homopolaire. Il analyse la pente de sa valeur efficace et repère les changements de son signe. Il considère que ces points caractéristiques correspondent aux instants d'apparition et d'extinction des transitoires de ces perturbations :

- ✓ Les transitoires d'apparition des défauts monophasés débutent au moment où le signe de l'indice de segmentation basé sur la pente devient positif (Figure 10-4-a).
- ✓ Le début des régimes transitoires d'extinction est signalé par le passage de l'indice dans le domaine négatif (Figure 10-4-b).

Ces conditions idéales ne traduisent toutefois pas le comportement réel de l'indice en présence de perturbations. Plusieurs phénomènes impactent son comportement :

- Les variations des régimes harmoniques et le bruit induisent de faibles oscillations sur l'indice de segmentation en régime permanent.
- La qualité de l'estimation de la fréquence fondamentale influence le calcul de la valeur efficace. L'utilisation de fenêtres d'intégration, dont la taille n'est pas correctement adaptée à cette fréquence, entraîne l'apparition d'oscillations régulières sur la valeur efficace. Leur amplitude est fonction de l'importance de cette désynchronisation. Ces oscillations se répercutent sur le comportement de l'indicateur : il présente des fluctuations de faible amplitude de part et d'autre de l'axe des abscisses.
- Des transitoires d'apparition et d'extinction « non significatifs » peuvent survenir si le défaut a une tendance réamorçante. Le transitoire observé sur la Figure 10-5 vers 450 ms est considéré comme tel. Ces perturbations sont difficilement identifiables visuellement à cause de leur brièveté et des faibles variations qu'elles induisent. Pour ces mêmes raisons, les méthodes extrayant les caractéristiques de leurs transitoires ne sont pas suffisamment précises pour fournir des informations fiables à des fins d'identification ou de localisation. On choisit de les ignorer et de les considérer comme un unique régime permanent.

Ces différents facteurs nécessitent la définition de marges de sécurité afin de se prémunir de détections erronées. Dans des conditions réelles, l'utilisation du seul signe de l'indice comme critère de décision est en effet insuffisante.



**Figure 10-5 – Comportement de l'indicateur « pente » en présence d'un défaut réamorçant**  
Perturbation causée par le défaut monophasé de la Figure 10-3

#### Définition des seuils de détection

L'ensemble des phénomènes précédents est considéré pour ajuster les seuils de détection. Deux hystérésis de détection distinctes sont définies pour analyser les parties positives et négatives de l'indice de segmentation (10-2).

- ✓ Leurs seuils hauts  $Threshold_{+Upper}$  et  $Threshold_{-Upper}$  sont utilisés pour détecter le début des transitoires d'apparition et d'extinction. Ils considèrent que les variations de l'indicateur, qui les dépassent, signalent la présence de transitoires.
- ✓ Leurs seuils bas  $Threshold_{+Lower}$  et  $Threshold_{-Lower}$  signalent la fin des régimes transitoires. Ils considèrent que les variations de l'indicateur inférieures à ce seuil relèvent de régimes permanents.

$$\boxed{\begin{array}{ll} \{Index(t_k) > Threshold_{+Upper} & , \text{transitoire d'apparition} \\ Index(t_k) < Threshold_{-Upper} & , \text{transitoire d'extinction} \\ Index(t_k) \in [Threshold_{-Lower}, Threshold_{+Lower}] & , \text{régime permanent} \end{array}} \quad (10-2)$$

Les valeurs des seuils des deux hystérésis ne sont pas symétriques. Elles tiennent compte des différences de dynamiques de l'indicateur observées pendant les deux types de régimes de fonctionnement : les seuils appliqués à la partie négative sont inférieurs à ceux imposés à la partie positive ( $|Threshold_{+Upper}| > |Threshold_{-Upper}|$ , par exemple).

Ces deux hystérésis assurent une détection robuste des régimes transitoires des défauts monophasés. Elles ont par contre l'inconvénient d'augmenter le retard de la décomposition brute fournie par le procédé de segmentation événementielle. Ce retard est compensé lors de l'étape suivante de post-traitement des segmentations (§10.6).

### **Méthode de décomposition**

La méthode de segmentation événementielle utilise l'indice de segmentation, les hystérésis de détection précédemment définis et la décomposition déterminée par la méthode de segmentation adaptative. A partir de ces informations, trois situations sont envisagées. Elles sont illustrées à la Figure 10-4 par plusieurs instants de détection fictifs.

La méthode de segmentation événementielle traite ces situations en plusieurs étapes :

- a. La méthode examine le signe et la valeur de l'indicateur de segmentation à l'instant de détection du transitoire par la méthode de segmentation adaptative. Les actions entreprises lors des étapes suivantes dépendent de la situation identifiée parmi les trois envisagées :
  1. Si celui-ci est positif et présente une valeur supérieure à  $Threshold_{+Upper}$ , on considère que le transitoire détecté correspond à un transitoire d'apparition (Figure 10-4-a).
  2. S'il est négatif et présente une valeur inférieure à  $Threshold_{-Upper}$ , il est considéré comme un transitoire d'extinction (Figure 10-4-b).
  3. S'il se trouve dans la zone d'incertitude ( $Threshold_{-Upper} < index < Threshold_{+Upper}$ ), la détection fournie par l'indice de segmentation est considérée comme trop précoce (Figure 10-4-a et -b).

Ces trois situations couvrent la quasi-totalité des cas rencontrés.

- b. A partir de cet instant de détection, deux analyses indépendantes sont réalisées.

Une analyse anti-causale de l'indicateur de segmentation affine l'évaluation de l'instant d'apparition du régime transitoire si les situations 1 ou 2 sont détectées. Elle recherche l'instant à partir duquel l'indice passe sous le seuil de détection haut associé au type de transitoires détecté ( $Threshold_{\pm Upper}$ ). Cette analyse n'est pas réalisée dans la situation 3, car le transitoire est censé débuter après l'instant fourni par la méthode de segmentation adaptative (Figure 10-4).

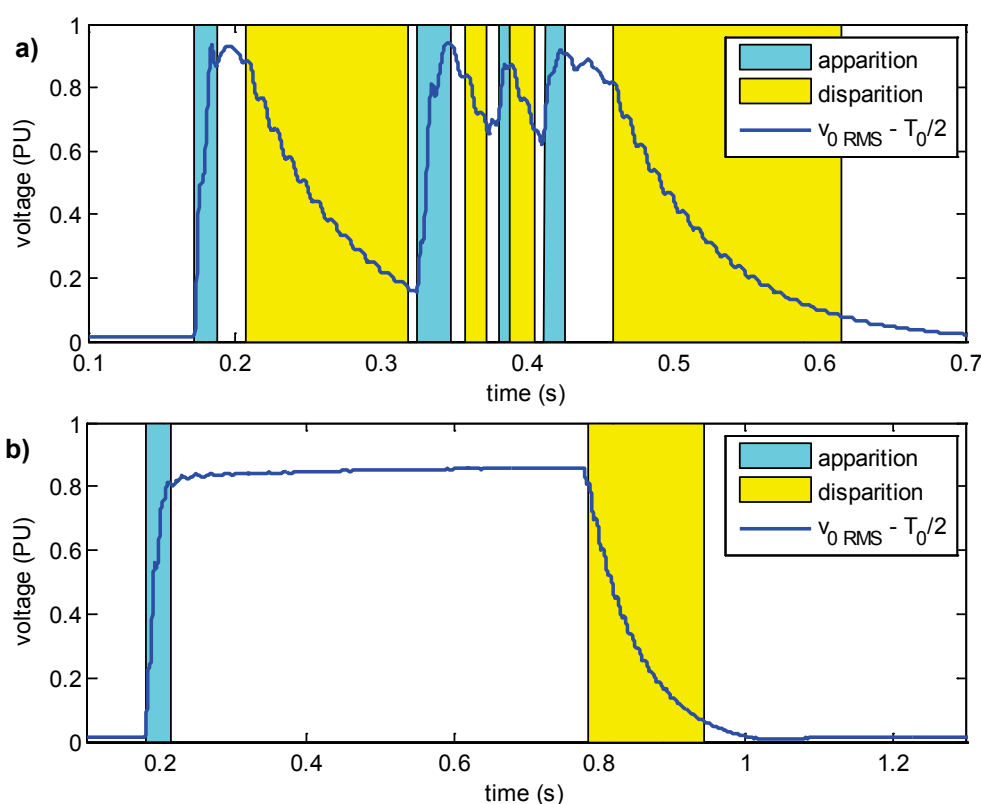
Une analyse causale de l'indicateur de segmentation est réalisée quelle que soit la situation. Les actions effectuées diffèrent par contre quelque peu.

1. Dans la situation 3, l'indicateur est d'abord comparé aux seuils hauts ( $Threshold_{\pm Upper}$ ) de l'hystérésis afin de déterminer le type du transitoire détecté par la méthode de segmentation adaptative. L'instant de dépassement correspond au début du régime transitoire. Cette étape est exclusive à la situation 3. Elle permet de se ramener à une situation similaire à celle des situations 1 et 2, à savoir un transitoire de type et de début connus.
2. Quelle que soit la situation préalablement détectée, les actions entreprises sont désormais identiques. L'indicateur est parcouru dans le sens causal. L'instant correspondant à son passage sous le seuil bas associé à son type de transitoire ( $Threshold_{\pm Lower}$ ) signale la fin du régime transitoire.

3. L'analyse causale est poursuivie sur une période  $T_0$  afin de détecter la présence éventuelle de régimes transitoires suivants. Au-delà, on suppose que la méthode de segmentation adaptative est en mesure de détecter tout nouveau régime transitoire.
  - Si, au cours de cette période, l'indice ne dépasse pas le seuil haut de l'hystérésis associée au type de transitoire opposé à celui initialement détecté (par exemple,  $Threshold_{Upper}$  si un transitoire d'apparition est d'abord identifié), le procédé de segmentation s'achève.
  - Sinon, l'instant correspondant au dépassement indique l'instant d'apparition d'un nouveau régime transitoire.

Les étapes 2 et 3 sont répétées tant que la condition d'interruption précédente n'est pas vérifiée et que la segmentation adaptative ne signale pas la présence d'un nouveau régime transitoire.

Les Figure 10-6–a et –b fournissent le résultat de la décomposition des régimes de fonctionnement déterminés par la méthode de segmentation événementielle pour les exemples de perturbations présentés à la Figure 10-3 et à la Figure 10-4. Les retards de détection y sont déjà corrigés.



**Figure 10-6 – Décomposition des régimes d'apparition et de disparition de défauts monophasés affectant les réseaux à neutre compensé après correction des retards**

a) Exemple de la Figure 10-3

b) Exemple de la Figure 10-4

## 10.6. Post-traitement des segmentations

### Fusion des segmentations ?

A la fin de l'étape précédente, une unique décomposition des formes d'onde est déterminée par le procédé de segmentation événementielle. En effet, seule la tension homopolaire (mesurée ou calculée) est analysée. Contrairement à la méthode de segmentation adaptative qui examine indépendamment les formes d'onde des tensions et des courants triphasés, une étape de fusion n'est pas requise. Cette méthode fournit directement une segmentation unifiée des perturbations.

### Compensation du retard

La problématique de la précision de la segmentation reste par contre entière. En effet, du fait des seuils utilisés pour analyser la pente de la valeur efficace de la tension homopolaire, la segmentation obtenue a toujours un certain retard. Ce retard est variable et dépend de paramètres tels que l'amplitude de la perturbation, la dynamique du transitoire ou la proximité des régimes de fonctionnement. Sa dispersion est toutefois moins importante que celle observée pour la segmentation adaptative (§9.1). Deux situations sont distinguées :

#### 1. Transitoires successifs

Dans le cas où deux régimes transitoires se succèdent (défauts auto-extincteurs ou réamorçants), une alternance du signe de la pente est observée (Figure 10-5). L'instant correspondant au passage par zéro de la pente approxime la position de la séparation entre ces deux régimes. Du fait de la spécificité de l'indice de segmentation utilisé, la précision de la méthode peut être facilement augmentée en recherchant ces instants à partir de l'instant de détection du transitoire. Cette recherche, algorithmiquement peu complexe, procède en deux étapes :

- Elle parcourt à rebours l'indice de segmentation  $index_{v0}$  et y recherche deux échantillons successifs ( $k_p-1$  et  $k_p$ ) de signe opposé (10-3).

$$\boxed{\text{sign}(index_{v0}(k_p - 1)) \text{ sign}(index_{v0}(k_p)) < 0} \quad (10-3)$$

- L'instant effectif du franchissement de l'axe des abscisses est déterminé par interpolation linéaire à partir de ces deux échantillons (10-4). Cette approximation est valable en raison du comportement quasi-linéaire de l'indice de segmentation à proximité des passages par zéro (Figure 10-5).

$$\boxed{\left. \begin{aligned} a &= \frac{index_{v0}(k_p) - index_{v0}(k_p - 1)}{t(k_p) - t(k_p - 1)} \\ b &= index_{v0}(k_p) - a \cdot t(k_p) \end{aligned} \right\} \longrightarrow t_{passage}(n) = -\frac{b}{a}} \quad (10-4)$$



On note que, dans cette situation, l'instant d'inversion de la pente de l'indicateur n'est qu'une approximation de l'instant d'apparition du transitoire. Cette approximation suppose que :

- ✓ les transitoires successifs sont espacés d'un intervalle supérieur au temps de réponse de l'indice de segmentation utilisé. Ce temps correspond au cumul du temps de réponse du calcul de la valeur RMS ( $T_0/2$ ) et de celui du calcul du gradient ( $\sim T_0/10$ ).
- ✓ la dynamique de l'ancien transitoire est beaucoup plus faible que celle du nouveau transitoire à l'instant où il apparaît.

Cette condition n'est pas vérifiée pour des défauts réamorçants séparés de moins de 10 ms tels que celui observé vers 450 ms sur la Figure 10-5. Dans ce cas, l'erreur de décomposition de la méthode est importante, car l'information fournie par l'indice de segmentation est inadaptée à cette situation.

On rappelle toutefois qu'on ne cherche pas à détecter ce type de transitoires lors de l'étape de décomposition, car ils sont inexploitable. Leur reconnaissance et donc leur décomposition présentent un intérêt limité. Pour les défauts considérés par la méthode de segmentation événementielle, les deux hypothèses précédentes sont remplies et l'approximation des instants d'apparition des transitoires déterminée par cette méthode est valide.

### **2. Transitoires « isolés »**

Dans le cas où un régime permanent sépare les régimes transitoires, la méthode précédente n'est plus applicable. Par exemple, pour le transitoire d'apparition du défaut de la Figure 10-4-a, le début n'est pas signalé par une telle inversion. Pour estimer le début de ces transitoires « isolés », on utilise le comportement quasi-linéaire de l'indicateur de segmentation à proximité des instants de détection. Contrairement aux indicateurs utilisés par la méthode de segmentation adaptative, cette hypothèse est beaucoup moins restrictive du fait de la dispersion limitée des erreurs de segmentation. Elle est uniquement mise en défaut en présence de fausses segmentations.

Cette méthode procède en deux étapes. La tangente à l'indicateur de segmentation est déterminée à l'instant de détection du transitoire. L'instant de début du régime transitoire est ensuite estimé en calculant son intersection avec l'axe des abscisses (Figure 10-7). La dynamique du régime de fonctionnement précédant le transitoire détecté étant quasi-nulle, ce point fournit une excellente estimation de son instant d'apparition.

#### **Remarque 5 : Distinction des deux situations de compensation**

La distinction entre ces deux situations est réalisée de manière très simple. Du fait des seuils de détection appliqués aux parties positives et négatives de l'indicateur, les instants de fin et de début de deux transitoires successifs ne sont pas identiques. Un court intervalle dépendant de la dynamique du régime transitoire d'extinction les sépare. On considère que s'il est inférieur à un  $10^e$  de période ( $T_0/10$ ), on se trouve dans le cas de deux transitoires successifs (cas n°1). Sinon, on utilise la méthode du cas n°2.

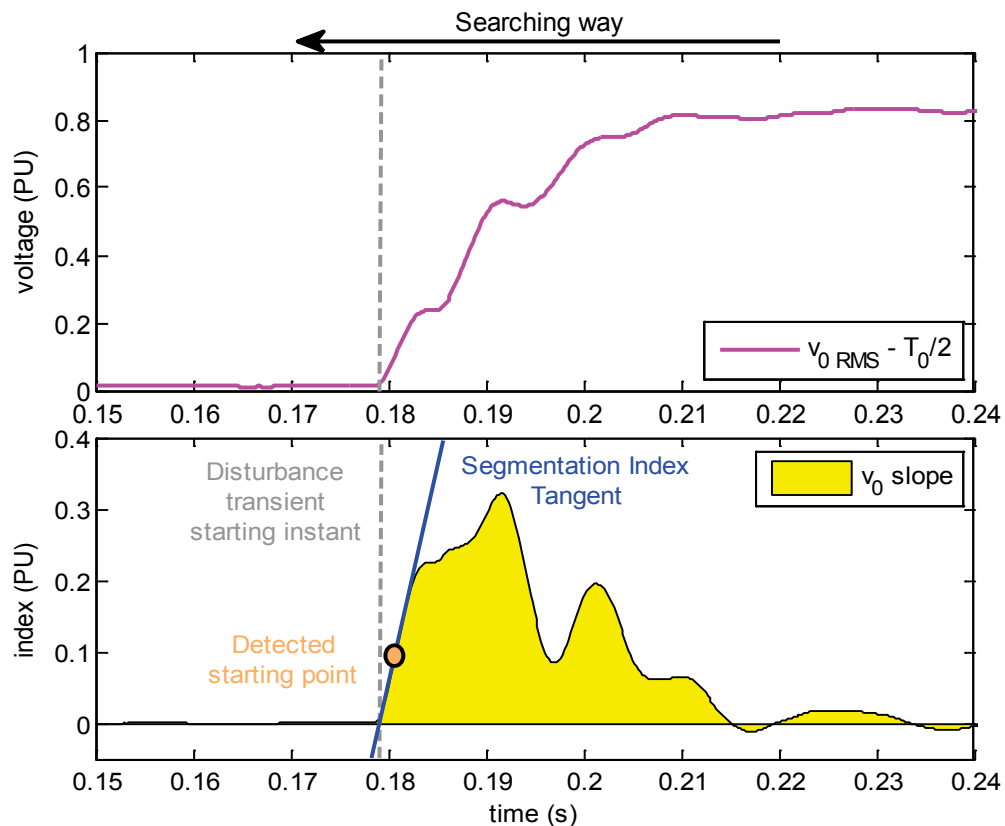


Figure 10-7 – Principe de la compensation du retard de détection pour les transitoires d'apparition « isolés »

## Chapitre 11 – Performances du procédé de segmentation

### 11.1. Description de la base d'évaluation

Plusieurs procédés de pré-traitement des formes d'onde et de correction des erreurs de segmentation sont investigués dans ce manuscrit. Leurs combinaisons sont à l'origine d'autant de variantes du procédé de segmentation. Pour les évaluer, une large base d'évènements est utilisée. Elle est constituée d'enregistrements réels, regroupés selon le type et la direction des perturbations. Elle comporte de nombreux représentants pour chaque type de perturbations du panel d'évènements recherchés. Différentes configurations – positions de la source de la perturbation par rapport au point de mesure – sont également considérées.

#### **Contenu de la base d'évaluation**

La base d'évaluation comporte environ 400 enregistrements de perturbations réalisés au jeu de barres de postes sources et environ 80 au niveau de postes de livraison clients. 150 correspondent à des perturbations amont, le reste étant localisé en aval des points d'observation. Ces perturbations surviennent sur les deux types de régime de neutre. Toutes les catégories de défauts (monophasés sur réseaux impédant et compensé, biphasés isolés et à la terre, triphasés) ainsi que de nombreux enclenchements de départs et de connexions de batteries de condensateurs y sont représentés. Ces perturbations constituent une population d'environ 2000 transitoires. Les instants d'apparition de chacun d'eux ont été déterminés par analyse visuelle des formes d'onde des perturbations. Ils servent de référence pour l'évaluation automatique des performances de la segmentation.

Pour l'évaluation de la méthode de segmentation événementielle, seuls les enregistrements des défauts monophasés apparaissant sur les réseaux à neutre compensé sont utilisés. Cet ensemble comporte 80 enregistrements de défauts survenant en aval de postes sources à partir desquels ils sont observés. Ces enregistrements représentent environ 500 transitoires.

#### **Fréquence d'échantillonnage des enregistrements**

La base d'enregistrements comporte des enregistrements réalisés par plusieurs appareils de qualimétrie avec des fréquences d'échantillonnage différentes (1,6, 2,5, 3,2, 5, 10 et 12,8 kHz). Pour faciliter leur analyse, ils sont rassemblés en deux groupes. Les enregistrements échantillonnés à 1,6, 2,5 et 3,2 kHz servent à évaluer les performances de l'algorithme en présence de signaux à faible résolution tandis que les autres permettent de l'évaluer en présence de signaux plus finement échantillonnés. Les enregistrements inclus dans ces deux catégories sont choisis de sorte que les proportions des différents types d'évènements soient les plus proches possibles. La comparaison des

résultats obtenus pour les deux ensembles est ainsi plus facilement interprétable. Environ 1200 transitoires sont analysés pour évaluer les performances de la segmentation sur des signaux faiblement échantillonnés et environ 800 pour évaluer celles sur des signaux plus finement échantillonnés. Les deux bases d'enregistrements diffèrent essentiellement par le fait que celle de plus basse fréquence ne comporte pas d'enregistrements d'enclenchements de batteries de condensateurs de compensation.

L'utilisation de perturbations enregistrées à plusieurs fréquences d'échantillonnage permet d'évaluer leur impact sur les performances du procédé de segmentation. De nombreux appareils de mesure observent les tensions et les courants à des fréquences inférieures à 5 kHz. En évaluant les performances des deux groupes de perturbations de manière indépendante, on estime la dégradation des performances de segmentation lors de l'analyse de signaux faiblement échantillonnés.

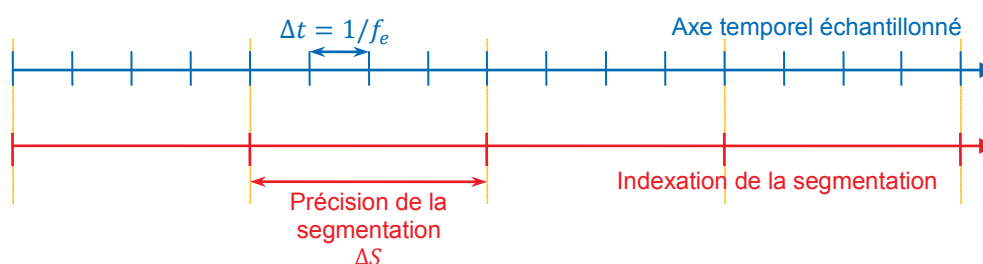
Une répartition similaire est utilisée pour la base d'enregistrements dédiée aux défauts monophasés. Elle comporte 48 enregistrements échantillonnés à basse fréquence et 32 à plus haute fréquence.

### **Homogénéisation des conditions d'évaluation**

Les deux groupes de la base d'enregistrements comportent des formes d'onde diversement échantillonnées. Même si leurs fréquences d'échantillonnage sont du même ordre de grandeur, la précision des segmentations n'est pas identique : la précision maximale de la décomposition de formes d'onde échantillonnées à 1,6 kHz est inférieure à celle de formes d'onde échantillonnées à 3,2 kHz. Leur pas d'échantillonnage est d'environ 0,6 ms dans le 1<sup>er</sup> cas et d'environ 0,3 ms dans l'autre.

Afin d'uniformiser les résultats et d'évaluer les enregistrements de chaque groupe de manière homogène, une base de segmentation commune est utilisée. Cette base est construite sur une unité de temps  $\Delta S$  partagée par l'ensemble des enregistrements du groupe. Elle correspond à la plus petite subdivision de l'axe temporel à partir de laquelle la décomposition déterminée par le procédé de segmentation est indexée (Figure 11-1). Elle limite artificiellement la précision du procédé de segmentation. Dans l'exemple précédent, les formes d'onde échantillonnées à 1,6 et 3,2 kHz sont décomposées avec la même précision ( $\Delta S = 0,6$  ms).

Cette opération d'homogénéisation est réalisée pour la base d'évaluation de la méthode de segmentation adaptative comme pour celle dédiée à la décomposition des défauts monophasés.



**Figure 11-1 – Lien entre l'échantillonnage de l'axe temporel et la précision de la segmentation**

Pour l'ensemble des enregistrements du 1<sup>er</sup> groupe, la précision de la segmentation est prise égale à  $1/32^e$  de période, soit environ 0,6 ms. Pour ceux du 2<sup>nd</sup> groupe, une précision de  $1/100^e$  de période, soit 0,2 ms, est sélectionnée.

## 11.2. Performances de la segmentation adaptative

Seuls des enregistrements d'événements réels sont utilisés pour évaluer les performances des procédés de segmentation développés, car ils permettent de tester leur comportement dans un environnement réaliste. Les confronter à des perturbations simulées n'aurait qu'un faible intérêt, car plusieurs phénomènes – tels que les variations de la fréquence fondamentale, des régimes harmoniques ou des caractéristiques du bruit – sont difficilement représentables par le biais de la simulation. Ces variations, indépendantes des événements majeurs, peuvent générer des artefacts sur les indices de segmentation et perturber la détection.

Les variantes du procédé de segmentation adaptatif sont évaluées à partir des critères introduits au paragraphe 6.2. Ils permettent de comparer leurs performances en termes de détection et de précision. Les résultats de cette évaluation sont synthétisés dans le Tableau 2. La partie gauche de chaque cellule est dédiée à l'analyse des signaux échantillonnés de 1,6 à 3,2 kHz, tandis que celle de droite est dédiée à l'analyse des signaux échantillonnés à des fréquences supérieures.

Méthode de filtrage	$T_{int}$	Correction du retard	Performances de détection		Performances de précision			
			$\tau_{detection}$ (%)	$\tau_{erreur}$ (%)	$m_r$ (ms)	$e_r$ (ms)	$\tau_{usable}$ (%)	$\tau_{false}$ (%)
HKF <sub>1</sub>	$T_0$	Statistique	98,7 / 99,2	6,3 / 5,2	0,17 / 0,06	3,08 / 2,56	84,3 / 90,7	6,3 / 5,2
		Analytique	99,2 / 99,6	6,5 / 5,4	0,27 / 0,04	1,24 / 0,87	96,2 / 98,5	6,5 / 5,4
HKF <sub>1357</sub>	$T_0$	Statistique	98,3 / 99,2	4,7 / 2,8	0,01 / 0,17	3,10 / 2,69	81,0 / 88,4	4,7 / 2,8
		Analytique	99,7 / 99,7	4,9 / 2,8	0,19 / 0,06	1,28 / 0,76	95,5 / 99,1	4,9 / 2,8
$T_0$ -AHF	$T_0$	Statistique	98,3 / 99,0	3,0 / 2,6	0,06 / 0,13	3,26 / 2,93	83,8 / 87,0	3,0 / 2,6
		Analytique	99,3 / 99,1	3,3 / 2,6	0,19 / 0,03	1,63 / 1,12	93,3 / 96,7	3,3 / 2,6
$T_0/2$ -AHF	$T_0$	Statistique	98,6 / 99,2	3,5 / 3,1	0,07 / 0,02	2,89 / 2,65	87,6 / 89,6	3,5 / 3,1
		Analytique	99,6 / 99,7	3,5 / 3,2	0,08 / 0,01	1,13 / 0,76	97,1 / 99,4	3,5 / 3,2

**Tableau 2 – Performances des variantes du procédé de segmentation adaptatif**

Groupe 1 :  $f_s \in [1, 6; 3, 2]$  kHz (partie gauche des cellules) et Groupe 2 :  $f_s \in [5 \text{ kHz}; 12, 8]$  kHz (partie droite).

### Impact de la méthode de pré-traitement

Pour les méthodes de filtrage retenues (filtrage de Kalman et filtrage anti-harmoniques), le pré-traitement des formes d'onde impacte principalement les performances de détection du procédé de segmentation. Les différences observées en termes de précision pour les deux méthodes sont faibles.

Ces constatations ne sont par contre plus valables lorsque le filtrage adaptatif ou l'analyse multi-résolution sont utilisées comme pré-traitements [CAU09].

Les indices déterminés par filtrage anti-harmoniques impairs ( $T_0/2$ -AHF) et filtrage de Kalman ( $\text{HKF}_{1357}$ ) sont très performants. Ils délivrent un taux de détection des transitoires supérieur à 98% et un taux de fausses détections inférieur à 5%. Ces bonnes performances sont principalement dues à leur bonne résolution et leur stabilité en régime permanent. Ils offrent également les meilleures performances en termes de précision lorsqu'ils sont associés à la méthode de compensation analytique.

Les performances obtenues avec les indices déterminés par filtrage anti-harmoniques total et filtrage de Kalman  $\text{HKF}_1$  sont plus faibles, mais restent acceptables.

### **Impact de la méthode de compensation du retard**

Comme en témoigne le Tableau 2, les deux méthodes de compensation du retard corrigent efficacement le retard moyen des segmentations et le ramènent à des valeurs proches de zéro. Dans le pire des cas, un retard moyen inférieur à 0,5 ms est obtenu pour des données échantillonnées à 1,6 kHz. Pour le filtrage de Kalman et le filtrage anti-harmoniques, ces performances dépendent peu de la méthode de filtrage des formes d'onde adoptée.

L'analyse de la variance des segmentations est par contre fortement impactée par le choix de la méthode de compensation.

- ✓ La méthode de compensation statistique n'a aucun impact sur cette valeur puisqu'elle se contente de corriger le retard en moyenne.
- ✓ La méthode de compensation analytique qui analyse les « points d'inversion » des indices de segmentation réduit de manière importante l'écart-type des segmentations. Elle est également fiable et peu dépendante du contexte (variations de régime harmonique, proximité de deux perturbations) car elle se fonde sur des hypothèses relativement faibles sur le comportement local de l'indice de segmentation. La réduction de la variance de la décomposition peut atteindre 60% par rapport à la méthode de compensation statistique.

### **Impact de la fréquence d'échantillonnage des formes d'onde**

Les performances de segmentation en terme de précision diminuent lorsque des signaux plus faiblement échantillonnés sont utilisés. Cette réduction a deux origines : une sensibilité d'analyse des données trois fois plus faible du fait de l'homogénéisation de la décomposition (§11.1) et un moins bon rapport signal sur bruit des formes d'onde analysées.

Cette réduction reste relativement limitée puisque, même à ces fréquences, les écart-types déterminés par la méthode de compensation analytique restent toujours inférieurs à 2,5 ms. De telles performances permettent une caractérisation et une reconnaissance fiables des perturbations

causées par les défauts et les enclenchements de départs (cf. Chapitre 15). Pour des fréquences d'échantillonnage plus importantes, cette capacité est réaffirmée par l'amélioration de l'écart-type des segmentations.

La précision de la segmentation semble par contre insuffisante pour analyser les enclenchements de batteries de condensateurs, même pour des fréquences d'échantillonnage élevées. En effet, son écart-type devrait être inférieur à 0,25 ms (cf. Chapitre 15). On rappelle toutefois que les résultats présentés dans le Tableau 2 correspondent aux performances génériques de l'algorithme de segmentation, c'est-à-dire pour l'ensemble des perturbations du panel d'évènements recherchés. Ses performances sont réduites notamment du fait de la présence d'évènements dont la décomposition est plus complexe en raison de la proximité des régimes transitoires. Comme les enclenchements de condensateurs sont des évènements survenant de manière isolée, la précision fournie par l'algorithme de segmentation est supérieure. Lorsque l'on considère uniquement les enregistrements d'enclenchements de batteries de condensateurs de la base, des valeurs d'écart-type de 0,28 ms et de 0,36 ms sont respectivement atteintes pour les indices de segmentation calculés par filtrage anti-harmoniques impairs et filtrage de Kalman HKF<sub>1357</sub>. Une telle précision est globalement suffisante pour la quasi-totalité de ces évènements. En effet, on verra au Chapitre 15 que les indicateurs les plus impactés par l'imprécision de la segmentation sont ceux analysant l'amplitude de la principale composante fréquentielle du transitoire d'enclenchement (§15.2.1.2). En cas de détection tardive, l'erreur faite sur l'amplitude dépasse rapidement les 10% alors que celles faites sur la fréquence et l'amortissement de cette composante restent contenues pendant au moins un quart de période ( $T_0/4$ ). Dans la grande majorité des cas, une erreur de 10% sur l'amplitude n'affecte pas de manière significative les performances d'identification de ces évènements. Seule la reconnaissance de perturbations de faible amplitude, telles que des enclenchements de batteries de condensateurs situées loin du point de mesure, risque d'être compromise.

Pour des fréquences d'échantillonnage plus basses, le comportement des formes d'onde pendant les transitoires d'enclenchements des batteries de condensateurs est peu détaillé. La fréquence principale du phénomène est en effet trop proche de la fréquence de Nyquist du signal ( $f_e/2$ ) pour permettre une extraction fiable des caractéristiques du transitoire. Seuls les indicateurs analysant leurs variations locales sont utilisées. Dans ces conditions, l'écart-type requis n'est plus que de 2 ms (§15.2.1.3). Ce pré-requis est vérifié par la méthode de compensation analytique quelle que soit la fréquence d'échantillonnage des formes d'onde.

### **Conclusion**

La méthode de segmentation adaptative proposée dans ce manuscrit remplit bien les objectifs fixés au Chapitre 6. Elle décompose les perturbations en régimes permanents et transitoires successifs de manière fiable et précise. Sa structure adaptative lui permet d'être peu sensible aux variations de

régimes harmoniques. Elle la rend également apte à détecter les transitoires proches des perturbations.

Des performances de détection optimales sont obtenues lorsque le filtrage anti-harmoniques impairs ( $T_0/2$ -AHF) ou le filtre de Kalman associé à un modèle harmonique d'ordre limité  $HKF_{1357}$  sont utilisés. L'emploi d'une fenêtre d'intégration de taille égale à une période permet également de réduire son taux de fausses alarmes.

Associée à la méthode de correction analytique du retard, elle fournit une décomposition très précise des régimes de fonctionnement des perturbations. Cette précision est suffisante pour caractériser efficacement la totalité des perturbations qu'elle recherche.

Cette méthode est uniquement mise en défaut par les perturbations induites par les défauts monophasés auto-extincteurs et réamorçants survenant sur les réseaux à neutre compensé. La présence de régimes transitoires successifs la rend inapplicable dans de telles situations. Pour pallier cette situation, elle est associée à la méthode de segmentation événementielle dont les performances sont évaluées dans le paragraphe suivant.

### Remarque 6 : Performances du procédé de segmentation adaptatif avec d'autres pré-traitements

Les documents [CAU09] et [CAU11c] montrent que le procédé de segmentation développé est moins précis lorsqu'il est associé à des indices de segmentation calculés par des méthodes de filtrage adaptatif associé à un modèle AR ou par analyse multi-résolution. Il présente, en particulier, des taux de détection plus faibles et des taux de fausses détections plus élevés. Ce constat s'accroît pour des fréquences d'échantillonnage peu élevées. Plusieurs facteurs expliquent ces performances :

- ✓ Ces deux méthodes de pré-traitement présentent une grande sensibilité aux variations du contenu harmonique des formes d'onde et une stabilité réduite en régime permanent.
- ✓ Leur capacité de détection des transitoires lents est en retrait par rapport aux deux méthodes de filtrage présentées dans ce manuscrit.
- ✓ Leurs caractéristiques sont moins « sympathiques » pour les algorithmes de compensation du retard analysant leur comportement local.

### **11.3. Performances de la segmentation événementielle**

Comme pour la méthode de segmentation adaptative, seuls des enregistrements de perturbations réelles sont utilisés pour évaluer les performances de la méthode de segmentation événementielle. Une seule variante de la méthode étant développée, on ne cherchera pas à évaluer l'impact de chacune des étapes du procédé de segmentation sur les performances globales de la méthode. Ces performances sont résumées dans le Tableau 3.



Fréquence d'échantillonnage	$\tau_{detection}$ (%)	$\tau_{erreur}$ (%)	$m_r$ (ms)	$e_r$ (ms)	$\tau_{usable}$ (%)	$\tau_{false}$ (%)
1,6-3,2 kHz	98,7	3,0	0,03	1,51	96,9	0
5,0-12,8 kHz	99,1	2,1	0,05	0,67	99,3	0

**Tableau 3 – Performances du procédé de segmentation événementielle**

On note que ces résultats sont obtenus en couplant la méthode de segmentation événementielle à la méthode de segmentation adaptative la plus performante, c'est-à-dire celle utilisant le filtrage anti-harmoniques impairs ( $T_0/2$ -AHF) et la méthode de correction analysant les points d'inversion. Le système de décision déclenchant l'application de la méthode événementielle est le système expert présenté plus tard au Chapitre 19. Les performances présentées dans ce tableau reflètent donc les performances de cette chaîne de traitements dans son ensemble lorsqu'elle est confrontée à des enregistrements réels de défauts monophasés affectant les réseaux compensés.

Les performances de détection et de précision délivrées par cette méthode sont très satisfaisantes.

Cette méthode est en mesure de détecter la quasi-totalité des transitoires d'apparition et d'extinction des perturbations. Cette capacité est d'ailleurs peu dépendante de la fréquence d'échantillonnage des formes d'onde mesurées. Ces bonnes performances sont conservées même dans le cas le plus contraignant, c'est à dire les défauts monophasés réamorçants, puisque toutes leurs phases significatives sont correctement discriminées.

La décomposition des régimes de fonctionnement successifs est également précise. L'écart-type des segmentations autorise la caractérisation fiable des régimes de fonctionnement.

- ✓ Pour les fréquences d'échantillonnage les plus élevées (5 à 12,8 kHz), il est proche de la contrainte de précision imposée par les méthodes d'identification utilisées par la phase de caractérisation des perturbations (§14.3).
- ✓ Pour des fréquences plus faibles, sa précision suffit à appliquer les méthodes analysant les variations locales des perturbations. La résolution du signal analysé étant alors trop faible, l'analyse comportementale est irréalisable. Dans ces conditions, les contraintes de précision sont relâchées : l'écart-type de la méthode de segmentation doit être inférieur à 2 ms.

On notera que le taux de transitoires  $\tau_{usable}$  assurant une caractérisation efficace des régimes transitoires est également élevé.

L'absence de transitoires non exploitables parmi les transitoires détectés  $\tau_{false}$  a pour origine la régularité de la tension homopolaire. En raison de cette propriété, les instants signalant le début des régimes transitoires d'apparition et de disparition des perturbations sont moins dispersés ( $|\tau| < 20$  ms).

## Partie 3

### Caractérisation des perturbations

#### Sommaire :

<b>CHAPITRE 12 – CARACTERISATION DES PERTURBATIONS</b>	<b>123</b>
12.1. OBJECTIFS DE LA CARACTERISATION	123
12.1.1. Principe de la caractérisation	123
12.1.2. Cadre d'utilisation des indicateurs	124
12.1.3. Sélection et mise en œuvre des indicateurs	124
12.2. ANALYSE DIFFERENCIEE DES REGIMES DE FONCTIONNEMENT	125
<b>CHAPITRE 13 – ANALYSE DES REGIMES PERMANENTS</b>	<b>128</b>
13.1. GRANDEURS ELECTROTECHNIQUES UTILISEES PAR LES INDICATEURS	128
13.2. INDICATEURS DE REGIMES PERMANENTS	128
13.3. REFERENCEMENT DES VARIATIONS	130
<b>CHAPITRE 14 – ANALYSE DES REGIMES TRANSITOIRES</b>	<b>132</b>
14.1. FAMILLES D'INDICATEURS UTILISEES	132
14.2. EXPLOITATION DES VARIATIONS LOCALES	132
14.2.1. Mise en œuvre des indicateurs « classiques »	133
14.2.2. Analyse des composantes symétriques	135
14.2.3. Analyse des puissances réactives	136
14.2.4. Analyse des valeurs moyennes	137
14.2.5. Analyse des valeurs efficaces calculées sur une base $T0/2$	138
14.2.6. Analyse des formes d'onde par filtrage anti-harmoniques	140
14.3. IDENTIFICATION DE MODELES COMPORTEMENTAUX	144
14.3.1. Modèle comportemental exponentiel	145
14.3.2. Modèle comportemental sinusoïdal amorti	147
<b>CHAPITRE 15 – SENSIBILITE AUX ERREURS DE SEGMENTATION</b>	<b>155</b>
15.1. IMPACT SUR LA CARACTERISATION DES REGIMES PERMANENTS	155
15.2. IMPACT SUR LA CARACTERISATION DES REGIMES TRANSITOIRES	156
15.2.1. Enclenchements de batteries de compensation	157
15.2.2. Réenclenchements de départs	161



## Chapitre 12 – Caractérisation des perturbations

### 12.1. Objectifs de la caractérisation

À la fin de l'étape de segmentation, les formes d'onde des perturbations sont décomposées en leurs régimes de fonctionnement permanents et transitoires. Sur chaque intervalle temporel identifié, les formes d'onde des tensions et des courants présentent des comportements et des dynamiques qui sont propres à la perturbation détectée.

Le système développé calcule un ensemble d'informations discriminantes pour chaque segment significatif. Il utilise ces informations pour mener à bien l'identification des événements responsables de ces perturbations. Dans ce manuscrit, on désigne cette étape du procédé de reconnaissance par l'expression de « phase de caractérisation des perturbations » (Figure 4-1).

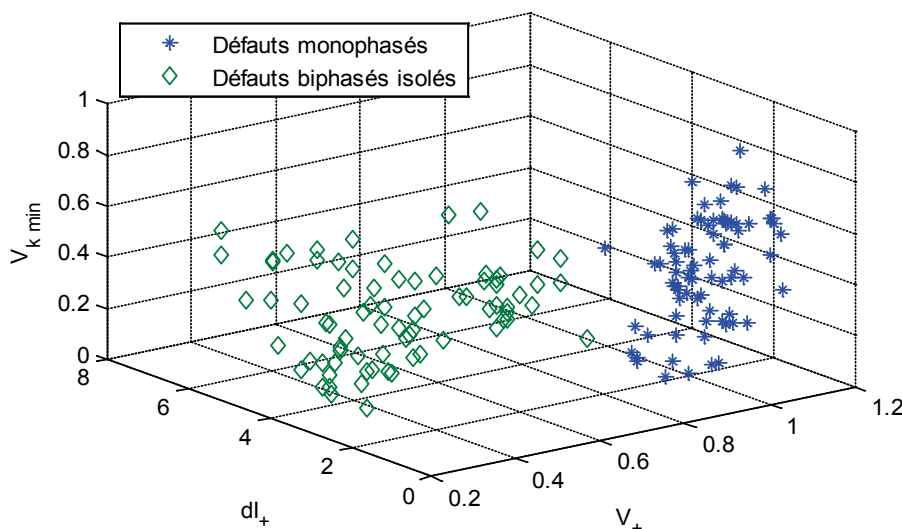
#### 12.1.1. Principe de la caractérisation

Les informations obtenues au cours de la phase de caractérisation sont synthétisées par un ensemble d'indicateurs de reconnaissance. Ces indicateurs ont été choisis après l'analyse critique d'un grand nombre de perturbations appartenant à chaque catégorie d'événements recherchée par le système. Les différents régimes de fonctionnement des perturbations de la vaste base d'événements réels utilisée ont été examinés afin d'en dégager les principales tendances et facteurs caractérisants. Les indicateurs ainsi identifiés témoignent d'une ou plusieurs caractéristiques propres à certaines catégories de perturbations. Ils analysent des grandeurs calculées par divers traitements à partir des formes d'onde des tensions et des courants.

En raison des différents types d'événements et des multiples configurations du réseau envisagées, un seul indicateur ne suffit pas à discriminer l'ensemble des perturbations recherchées. Pour ce faire, on définit, pour chaque type de régimes de fonctionnement, un groupe de plusieurs indicateurs qui lui est propre. Chaque indicateur contribue à affiner la caractérisation de la perturbation et peut être exploité pour orienter sa reconnaissance. Par exemple, un indicateur analysant le comportement de la tension homopolaire renseigne sur la présence d'un contact à la terre d'une ou plusieurs phases du réseau au cours de l'intervalle temporel analysé.

Les indicateurs définis pour chaque régime de fonctionnement du réseau représentent les perturbations dans une base de dimension finie qui reflète un ensemble de caractéristiques propres aux perturbations recherchées. Deux bases distinctes sont constituées. La première représente les régimes transitoires des perturbations et la seconde reflète leurs régimes permanents. Lors de l'étape

de caractérisation, les régimes de fonctionnement des perturbations identifiés par l'étape de segmentation sont décrits dans une base d'indicateurs qui leur est propre. Les valeurs des indicateurs déterminées pour chaque segment constituent la signature de la perturbation au cours du régime de fonctionnement associé.



**Figure 12-1 – Représentation de deux classes de défauts (défauts monophasés et biphasés isolés aval) dans un espace constitué de 3 indicateurs**

(indicateurs : valeur de la composante directe des tensions, variation de celle des courants et valeur efficace de la tension de la phase présentant le creux de tension le plus important)

### 12.1.2. Cadre d'utilisation des indicateurs

Les indicateurs définis par le système de reconnaissance sont utilisés dans deux cadres intimement liés : l'apprentissage des signatures des perturbations et la discrimination des classes d'événements perturbateurs. Lors de l'apprentissage, un très grand nombre de perturbations est analysé. Elles correspondent à différentes configurations du réseau. Elles sont employées pour approcher les domaines d'existence des classes d'événements recherchées dans les bases de représentation des indicateurs (Figure 12-1) et pour en déterminer le modèle. Ces modèles sont ensuite utilisés par des systèmes de décision experts ou par des classifieurs SVM pour discriminer les classes des nouvelles perturbations enregistrées.

Les phases d'apprentissage du modèle des perturbations et de discrimination des classes d'événements sont traitées dans la Partie 4 de ce mémoire. L'architecture de décision utilisée pour exploiter les indicateurs y est également spécifiée.

### 12.1.3. Sélection et mise en œuvre des indicateurs

Plusieurs éléments entrent en considération lors du choix et de la mise en œuvre des indicateurs utilisés pour caractériser les régimes de fonctionnement des perturbations.

Les indicateurs de reconnaissance sont choisis pour *maximiser l'extraction des caractéristiques* des

perturbations. On limite ainsi le nombre d'indicateurs à analyser pour discriminer les différentes classes d'événements et donc le nombre de critères à appliquer. La complexité du système est maîtrisée et son taux de reconnaissance est amélioré grâce à la réduction du nombre d'informations redondantes à analyser.

Afin d'augmenter la robustesse des indicateurs, deux facteurs sont étudiés : leurs *sensibilités aux perturbations harmoniques permanentes* et *aux erreurs de segmentation* (détections précoces ou tardives des transitoires). Leurs domaines de validité vis-à-vis de telles caractéristiques sont préalablement déterminés afin d'être intégrés au système. La problématique de sensibilité des indicateurs aux erreurs de segmentation est illustrée au Chapitre 15 sur une sélection d'indicateurs.

La *complexité algorithmique* des indicateurs de reconnaissance est aussi considérée. Les indicateurs sélectionnés et les méthodes d'analyse des formes d'onde utilisées pour les déterminer cherchent à limiter le coût global de l'étape de reconnaissance. Sa prise en compte conditionne l'architecture de l'étape de reconnaissance ainsi que les structures de décision des systèmes experts.

Le choix des caractéristiques à exploiter ainsi que la mise au point des différents indicateurs de reconnaissance ont été réalisés sur la base d'enregistrements de perturbations réelles. Les perturbations simulées ont ensuite permis de déterminer leurs plages de variations afin de mettre au point les systèmes de reconnaissance expert et SVM (Chapitre 18 et Chapitre 19).

Le Chapitre 13 et le Chapitre 14 présentent une sélection d'indicateurs qui sont utilisés par le système de reconnaissance pour caractériser les régimes de fonctionnement transitoires et permanents des défauts et des perturbations d'enclenchements.

### 12.2. Analyse différenciée des régimes de fonctionnement

La caractérisation des perturbations passe par l'analyse des régimes de fonctionnement transitoires et permanents des perturbations. Sur ces deux types d'intervalles, les perturbations présentent une dynamique distincte qu'il convient de traiter différemment afin d'extraire au mieux leurs informations. Un jeu d'indicateurs propre à l'étude des régimes permanents et un dédié à l'examen des régimes transitoires sont utilisés lors de l'étape de caractérisation (Figure 12-2). Leur emploi repose sur la décomposition des régimes de fonctionnement fournie par l'étape de segmentation précédente.

L'analyse différenciée des phases des perturbations repose sur plusieurs arguments :

#### **Nécessité d'une adaptation de la méthode d'analyse à la dynamique des perturbations**

Les formes d'onde et les grandeurs électrotechniques associées évoluent peu lors des régimes dits « permanents » mais elles présentent des variations importantes lors des régimes qualifiés de « transitoires ». De plus, des comportements transitoires différents sont observés suivant la catégorie

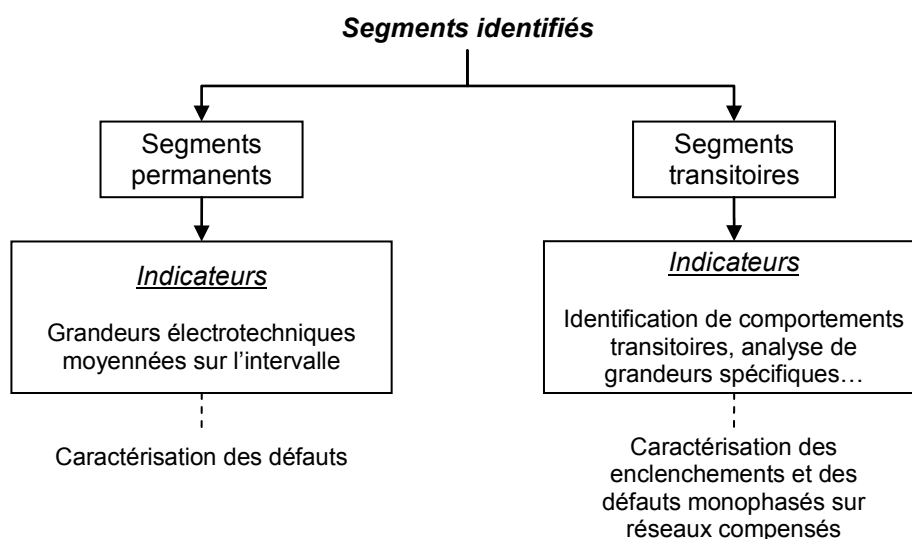
de perturbations (Chapitre 2).

La diversité des dynamiques rencontrées rend impossible l'utilisation d'un jeu d'indicateurs qui caractériserait les deux régimes de fonctionnement de manière unifiée. Les informations qui y sont recherchées et les méthodes d'analyse employées pour les extraire sont de nature et de complexité algorithmique très différentes.

Des grandeurs et des méthodes simples suffisent à caractériser les régimes permanents en raison de leur faible dynamique. L'analyse de grandeurs électrotechniques – telles que les valeurs efficaces des tensions et des courants, leurs composantes symétriques... – moyennées sur les intervalles permanents fournit suffisamment d'informations discriminantes.

De telles méthodes ne sont, par contre, pas applicables à l'analyse des régimes transitoires car ils présentent des variations importantes et très localisées. Sur ces intervalles, l'utilisation de quantités moyennées entraîne une perte d'informations très importante. Pour y remédier, on privilégie des méthodes à même d'observer ces variations et d'en extraire les caractéristiques. Elles reposent, par exemple, sur l'étude du comportement transitoire de grandeurs telles que les formes d'onde obtenues après filtrage anti-harmoniques (§14.2.6) ou sur l'analyse des valeurs efficaces calculées sur une demi-période (§14.2.5). Elles estiment également les paramètres des modèles comportementaux apparaissant dans les transitoires des perturbations électriques, c'est-à-dire des modèles exponentiels et sinusoïdaux amortis (§14.3).

L'application de telles méthodes sur des segments de régime permanent présente un intérêt nul puisque la dynamique recherchée par ces indicateurs y est absente. Elle entraînerait un surcoût important de l'étape de caractérisation.



**Figure 12-2 – Types d'informations recherchées selon le régime de fonctionnement**

### **Nature des perturbations recherchées**

Le type de perturbations recherchées par le système d'identification (Chapitre 2) favorise également

leur caractérisation par un système d'analyse différenciée.

Pour la majeure partie des défauts, les transitoires d'apparition, d'évolution et de rétablissement sont très brefs. Ils durent moins d'une demi-période et ne présentent pas d'informations utiles pour leur identification. L'utilisation de ces transitoires par le système a donc peu d'intérêt pour la reconnaissance de telles perturbations.

Inversement, les perturbations de type enclenchements de départs et de batteries de condensateurs sont essentiellement transitoires. L'essentiel des informations permettant une caractérisation efficace est contenu dans le comportement des formes d'onde observées sur ces intervalles.

Seuls les défauts monophasés survenant sur les réseaux compensés ne satisfont pas totalement cette condition, car leurs régimes transitoires et leurs régimes permanents sont porteurs d'un grand nombre d'informations. Pour ces défauts, se contenter des indicateurs analysant les régimes permanents est insuffisant. En effet, ils ne présentent pas nécessairement un régime permanent entre un transitoire d'apparition et un transitoire d'extinction successifs (§2.3). La caractérisation de ce type de perturbations doit donc s'effectuer *a minima* sur leurs régimes transitoires. Notre système les caractérise sur les deux types de régimes de fonctionnement pour les reconnaître quel que soit le régime de fonctionnement. Toutefois, comme la dynamique de ces deux régimes est différente, ils sont décrits par deux jeux d'indicateurs distincts.

Ainsi, quelle que soit la nature de la perturbation du panel d'évènements considérés (défauts, enclenchements de départ, enclenchements de batteries de compensation...), le principe de l'analyse différenciée de leurs régimes de fonctionnement peut être appliqué. Il requiert l'établissement de deux jeux d'indicateurs distincts, adaptés au régime de fonctionnement, et la mise en place d'autant de structures de décision.

### **Simplification du système de décision lors la phase d'identification**

La caractérisation distincte des régimes permanents et transitoires présente l'avantage de simplifier l'architecture du système de reconnaissance utilisé lors de la phase d'identification. L'analyse des régimes permanents des formes d'onde conduit à la caractérisation des perturbations de type « défauts », tandis que celle des régimes transitoires conduit à la caractérisation des perturbations de type « enclenchements » et « défauts monophasés sur neutre compensé ».

Cette simplification a l'avantage de réduire de manière importante la complexité et le coût de la reconnaissance des perturbations.

Le procédé de reconnaissance développé est donc auto-suffisant. Les informations déterminées pour chaque segment n'ont pas besoin d'être recoupées pour identifier les perturbations affectant les formes d'onde. Aucune opération de synthèse n'est réalisée après la classification des évènements électrotechniques.



## Chapitre 13 – Analyse des régimes permanents

Lors de l'étape de caractérisation, les régimes permanents des perturbations sont décrits par des indicateurs basés sur des grandeurs électrotechniques classiques (valeurs efficaces, composantes symétriques...). Ces indicateurs résultent de l'analyse de grandeurs moyennées calculées sur la totalité de la durée des intervalles permanents. Ils exploitent soit les valeurs moyennes du régime permanent analysé, soit les variations observées entre deux régimes permanents.

Les indicateurs basés sur des calculs de moyenne sont adaptés à la dynamique des perturbations sur les régimes permanents, car les formes d'onde et leurs grandeurs électrotechniques évoluent peu au cours des intervalles temporels correspondant à ces régimes de fonctionnement. Ces indicateurs fournissent suffisamment de renseignements sur les événements à l'origine des perturbations.

### 13.1. Grandeurs électrotechniques utilisées par les indicateurs

Les indicateurs analysant les régimes permanents sont dédiés à la caractérisation des perturbations causées par les défauts, les raccordements et déconnexions de charges ainsi que l'injection de signaux de TCFM. Ils ont une formulation très simple et se basent sur des grandeurs électrotechniques telles que les valeurs efficaces des tensions et des courants, leurs composantes symétriques, les valeurs moyennes des formes d'onde ou leurs composantes fréquentielles principales. A titre d'exemples, plusieurs indicateurs utilisés par les systèmes de décision dédiés à l'analyse des régimes permanents sont présentés dans ce chapitre.

### 13.2. Indicateurs de régimes permanents

L'analyse du comportement permanent du système des tensions apporte des informations essentielles sur les perturbations permanentes. Plusieurs indicateurs exploitent les valeurs efficaces des tensions simples et composées calculées de manière glissante sur une période  $T_0$  (13-1). Des indicateurs portant sur les composantes symétriques du système des tensions sont également employés de manière similaire (13-2). D'autres, étudiant les écarts entre les amplitudes des tensions simples et composées, viennent compléter ces renseignements (13-3).

Tous ces indicateurs sont exprimés par rapport à leurs tensions de référence ( $V_n$  et  $U_n$ ). Ces niveaux de tensions correspondent à ceux observés lors du dernier régime de fonctionnement normal du réseau. Ils sont utilisés pour normaliser tous les calculs effectués sur les tensions.

$$\langle V_{eff\ k} \rangle = \underset{t \in RP}{mean}(V_{eff\ k}(t)/V_n) \quad \langle U_{eff\ k} \rangle = \underset{t \in RP}{mean}(U_{eff\ k}(t)/U_n) \quad \text{Où : } k = \{a, b, c\} \quad (13-1)$$

$$\langle V_+ \rangle = \underset{t \in RP}{mean}(V_+(t)/V_n) \quad \langle V_- \rangle = \underset{t \in RP}{mean}(V_-(t)/V_n) \quad \langle V_0 \rangle = \underset{t \in RP}{mean}(V_0(t)/V_n) \quad (13-2)$$

$$\Delta V_{ij} = \langle V_{eff\ i} \rangle - \langle V_{eff\ j} \rangle \quad \Delta U_{ij} = \langle U_{eff\ i} \rangle - \langle U_{eff\ j} \rangle \quad \text{Où : } (i, j) = \{a, b, c\} \text{ et } i \neq j \quad (13-3)$$

Les informations contenues dans les courants sont également exploitées par plusieurs indicateurs. Ils portent sur les variations observées entre le régime permanent étudié et un régime permanent précédent pris comme référence  $RP_{ref}$ . Les grandeurs électrotechniques concernées sont les valeurs efficaces des courants de phase (13-4) ainsi que leurs composantes symétriques (13-5). Le choix de l'intervalle permanent de référence  $RP_{ref}$  utilisé pour déterminer ces variations est traité au paragraphe suivant.

$$\Delta I_{eff\ k} = \underset{t \in RP}{mean}(I_{eff\ k}(t)) - I_{eff\ k}(RP_{ref}) \quad \text{Où : } k = \{a, b, c\} \quad (13-4)$$

$$\begin{aligned} \Delta I_+ &= \underset{t \in RP}{mean}(I_+(t)) - I_+(RP_{ref}) \\ \Delta I_- &= \underset{t \in RP}{mean}(I_-(t)) - I_-(RP_{ref}) \\ \Delta I_0 &= \underset{t \in RP}{mean}(I_0(t)) - I_0(RP_{ref}) \end{aligned} \quad (13-5)$$

Des indicateurs fondés sur l'analyse des puissances viennent les compléter. De forme similaire, ils sont déterminés à partir des variations des puissances actives, réactives et apparentes.

Les précédentes catégories d'indicateurs fournissent un nombre de renseignements suffisant pour identifier, de manière fiable, les perturbations causées par les défauts et les raccordements de charges. Ils ne permettent par contre pas d'identifier certains événements détectés par le système de segmentation, comme les trames de TCFM. Pour ce faire, un indicateur vérifiant la présence d'une composante fréquentielle à 175 Hz leur est adjoint (13-6). Il s'appuie sur la décomposition spectrale des formes d'onde sur le régime permanent considéré. Afin d'assurer une résolution fréquentielle suffisante ( $\Delta f \leq 5\text{Hz}$ ), cet indicateur est uniquement déterminé si l'intervalle permanent analysé est supérieur à 200 ms. Sinon, la valeur renvoyée est nulle.

$$\langle V_{k\ 175} \rangle = \underset{t \in RP}{mean}(V_{k\ 175}(t)/V_n) \quad \text{Où : } k = \{a, b, c\} \quad (13-6)$$

Avec :  $V_{k\ 175}$  est l'amplitude de la composante du spectre à la fréquence de 175 Hz

Tous ces indicateurs caractérisent les régimes permanents des différents types de perturbations. On rappelle toutefois que des indicateurs dédiés à l'analyse des régimes transitoires des défauts monophasés apparaissant sur les réseaux à neutre compensé doivent être utilisés. Ils sont présentés au chapitre suivant.

### 13.3. Référencement des variations

#### Problématique du référencement

Les indicateurs analysant les variations de grandeurs électrotechniques telles que les courants ou les puissances nécessitent la définition de références de comparaison. Ces références sont déterminées à partir d'intervalles temporels  $RP_{ref}$  particuliers. Leur choix conditionne leurs valeurs et donc les informations qu'elles traduisent. Ce constat est particulièrement marqué pour les perturbations complexes, c'est-à-dire pour celles comportant plusieurs phases qui témoignent de leurs évolutions successives.

En choisissant, par exemple, de ne comparer que les régimes permanents successifs, la caractérisation fournie par les indicateurs est difficilement exploitable à des fins de reconnaissance. La Figure 13-1 illustre un tel cas. Au cours des premières phases de la perturbation (intervalles 1 à 3), la présence du défaut monophasé est caractérisée par une augmentation du courant de la phase en défaut. Mais, lorsque le fonctionnement du disjoncteur shunt prend fin (vers 620 ms), ce courant chute alors que le défaut monophasé persiste. Dans ce contexte, la caractérisation fournie par les variations des courants est inexploitable. Par contre, si le dernier régime de fonctionnement normal du réseau (intervalle 0) est utilisé comme référence, la variation des courants évolue dans le même sens pour chacune des phases de la perturbation (intervalles 1 à 4). Un comportement similaire est observé pour les variations des tensions et des puissances.

Cette problématique apparaît également lors de la normalisation des tensions. Celle-ci est toutefois moins critique, car leurs variations entre deux régimes permanents sans défaut sont plus faibles.

#### Intervalles référents

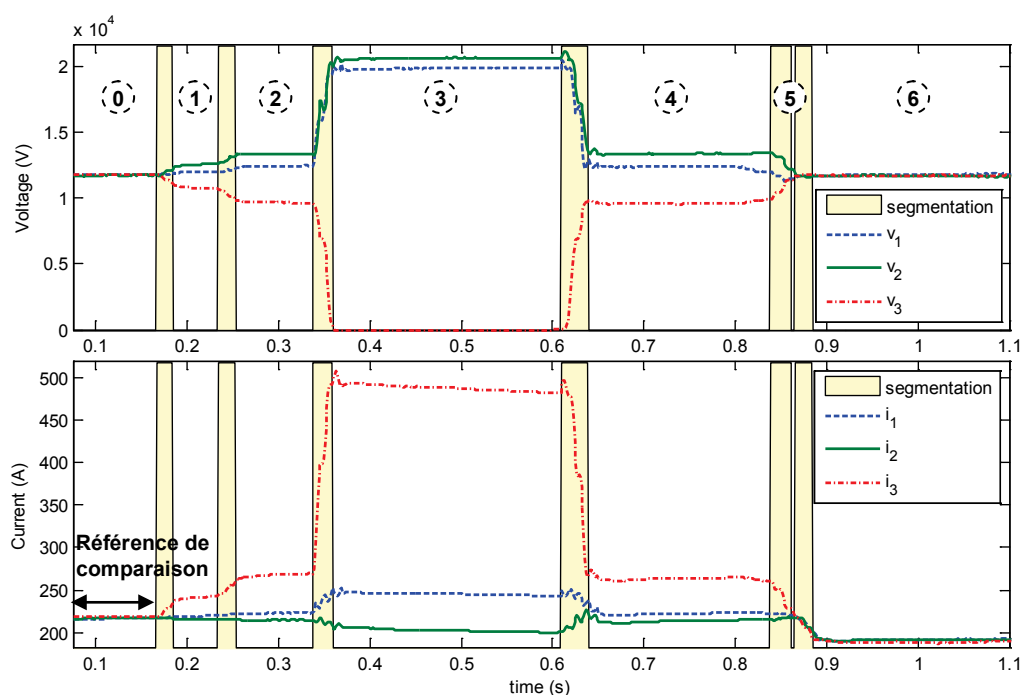
Pour caractériser les perturbations de manière uniforme et profiter d'un maximum d'informations sur leur nature, leur origine et leur évolution, on référence ces variations de deux manières.

Les informations sur le type et la direction des perturbations sont obtenues en référençant les calculs de variations par rapport au dernier régime de fonctionnement permanent sans défaut. Elles sont remises à jour au fur et à mesure de l'analyse des segments des formes d'onde. Chaque fois qu'un tel régime est atteint, il est conservé comme référence. Dans l'exemple de la Figure 13-1, les régimes permanents, utilisés successivement comme référence, sont les intervalles 0, 5 et 6.

L'indexation des calculs de variations par rapport au dernier régime permanent sans défaut garantit l'uniformité et la robustesse des informations renseignant sur le type et la direction des perturbations. En contrepartie, elle induit une dépendance de l'analyse des différents segments : le résultat de l'identification du segment permanent  $n-1$  influence la caractérisation et donc l'identification de la perturbation sur le segment permanent  $n$ .

Si l'analyse des variations observées entre deux régimes permanents consécutifs ne permet pas de conclure sur la catégorie et l'origine de perturbations complexes, elle fournit par contre d'autres renseignements. Elle permet d'affiner le contexte de la perturbation. Dans l'exemple de la Figure 13-1, l'étude des variations informe sur les évolutions du défaut monophasé, c'est-à-dire sur les réductions et augmentations de sa résistance...

Pour la normalisation des tensions, seul l'intervalle correspondant au dernier régime permanent sans défaut est utilisé comme référent. Pour l'analyse de leurs variations, les deux types d'intervalles sont par contre utilisés.



**Figure 13-1 – Influence du référencement pour les variations des courants**

- 0 : régime de fonctionnement permanent (référence) ; 1 : défaut monophasé sur la phase 3 ;  
 2 : défaut monophasé avec résistance plus faible ; 3 : fonctionnement du disjoncteur shunt  
 4 : persistance du défaut monophasé sur la phase 3 ; 5 : régime de fonctionnement initial (0)  
 6 : nouveau régime de fonctionnement après déclenchement du départ en défaut

## Chapitre 14 – Analyse des régimes transitoires

### 14.1. Familles d'indicateurs utilisées

Lors des régimes transitoires des perturbations, les formes d'onde présentent une dynamique importante et très variable. En raison de leur caractère fortement passe-bas, les indicateurs utilisés pour l'analyse des régimes permanents ne permettent pas de traduire de telles variations. Ils sont insuffisants pour procéder à l'analyse des événements transitoires.

La caractérisation des connexions de batteries de condensateurs, des enclenchements de départs et des défauts monophasés apparaissant sur les réseaux compensés nécessite des indicateurs aptes à renseigner sur le comportement de ces perturbations. Au cours de cette étape, deux familles d'indicateurs sont utilisées. Elles reposent sur :

1. Les variations extrémales survenant au cours du régime transitoire et les variations observées entre les deux régimes permanents l'encadrant.
2. Les paramètres de modèles comportementaux déterminés par des méthodes d'ajustement.

La complexité calculatoire de ces deux familles est très différente. La charge de calcul de la première est très inférieure à celle requise pour la détermination des paramètres de modèles complexes.

### 14.2. Exploitation des variations locales

Les indicateurs analysant les variations locales des formes d'onde et de leurs grandeurs associées fournissent une caractérisation rapide des transitoires. Moins précis que ceux calculés par ajustement de modèles, ils ne suffisent pas à garantir à eux seuls la reconnaissance parfaitement fiable des perturbations transitoires. Ils ont par contre l'avantage de fournir rapidement des informations susceptibles d'orienter et de restreindre la recherche de l'évènement perturbateur.

Ces indicateurs exploitent plusieurs sortes de grandeurs : des grandeurs électrotechniques classiques comme les composantes symétriques, les puissances réactives ou les valeurs moyennes, mais également les signaux déterminés par filtrage anti-harmoniques ou les valeurs efficaces des formes d'onde calculées sur la base d'une demi-période du signal. Leur comportement est analysé sur deux intervalles d'observation distincts afin de tenir compte des différentes dynamiques des transitoires.

### 14.2.1. Mise en œuvre des indicateurs « classiques »

#### 14.2.1.1. Comportements analysés

Parmi les indicateurs caractérisant les régimes transitoires des perturbations, plusieurs analysent les variations locales de grandeurs électrotechniques classiques. Ils distinguent trois types de variations :

- la variation extrême de la grandeur à l'apparition de la perturbation  $\Delta X^{-1}$ ,
- la variation constatée entre les deux régimes permanents encadrant le transitoire  $\Delta X^{RP}$ ,
- la variation extrême observée par rapport au nouveau régime établi  $\Delta X^{+1}$ .

$$\begin{cases} \Delta X^{-1} = \underset{t \in [t_0, t_0+I]}{\text{extremum}}(X(t) - X(RP_{-1}^0)) \\ \Delta X^{+1} = \underset{t \in [t_0, t_0+I]}{\text{extremum}}(X(t) - X(RP_{+1}^0)) \\ \Delta X^{RP} = X(RP_{-1}^0) - X(RP_{+1}^0) \end{cases} \quad \text{Où : } I \text{ est un intervalle de référence} \quad (14-1)$$

En fonction de la grandeur analysée, les trois variations ne sont pas toutes utilisées comme indicateurs car elles ne fournissent pas nécessairement des renseignements discriminants permettant de caractériser les perturbations transitoires. Dans ce cas, elles ne sont pas utilisées lors des phases d'apprentissage et de discrimination des classes de perturbations recherchées.

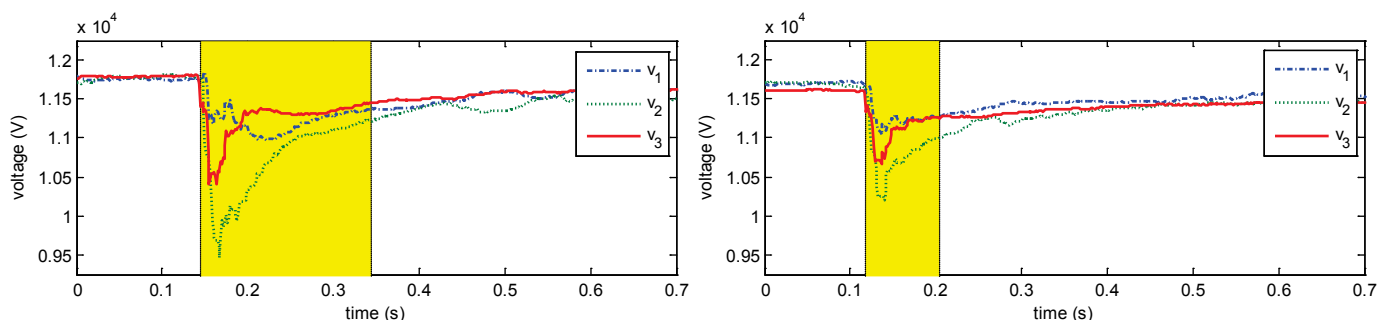
Suivant la famille d'indicateurs considérée, différents types d'intervalles  $I$  sont utilisés pour observer les variations des grandeurs qu'ils exploitent. Ils reflètent la dynamique des régimes transitoires qu'ils cherchent à caractériser. Leur choix tient compte de la famille de perturbations visée par l'indicateur ainsi que des éventuelles particularités du comportement de l'indicateur (§14.2.1.2).

De part et d'autre de l'intervalle  $I$ , deux intervalles renseignent sur l'état de la grandeur avant et après l'apparition du transitoire de la perturbation. Ils sont désignés dans ce paragraphe par les expressions  $RP_{-1}^0$  et  $RP_{+1}^0$ . Contrairement à ceux utilisés pour caractériser les régimes permanents ( $RP_{-1}$  et  $RP_{+1}$ ), ils sont déterminés sur des intervalles temporels plus limités, typiquement de l'ordre d'une à deux périodes. Cette largeur restreinte améliore la précision des informations fournies par les indicateurs, en particulier lorsque les variations de la grandeur analysée sont faibles. Ce choix augmente par contre leur sensibilité vis-à-vis de la précision de la segmentation (Chapitre 15).

#### 14.2.1.2. Intervalles d'observation des transitoires

Les informations déterminées lors de l'analyse des variations locales observées en présence de régimes transitoires dépendent de l'intervalle d'observation  $I$  utilisé. Dans certains cas, la décomposition renvoyée par l'algorithme de segmentation peut être utilisée de manière brute. La durée des segments transitoires dépend alors de la durée du transitoire associé ainsi que de l'amplitude et de la dynamique de la perturbation. Pour les défauts et les enclenchements de

condensateurs, cet intervalle est corrélé avec le transitoire réel des perturbations. Par contre, pour des perturbations générées par des réenclenchements de départs, sa taille est très variable et généralement largement sous-estimée (Figure 14-1). Cette caractéristique est due à la dynamique d'adaptation de l'algorithme de segmentation utilisé. Sa capacité de détection, sa résolution et sa précision sont privilégiées par rapport à sa capacité à évaluer précisément la fin des transitoires lents.



**Figure 14-1 – Variabilité de la durée du segment transitoire pour deux enclenchements de départ situés en aval du point de mesure**

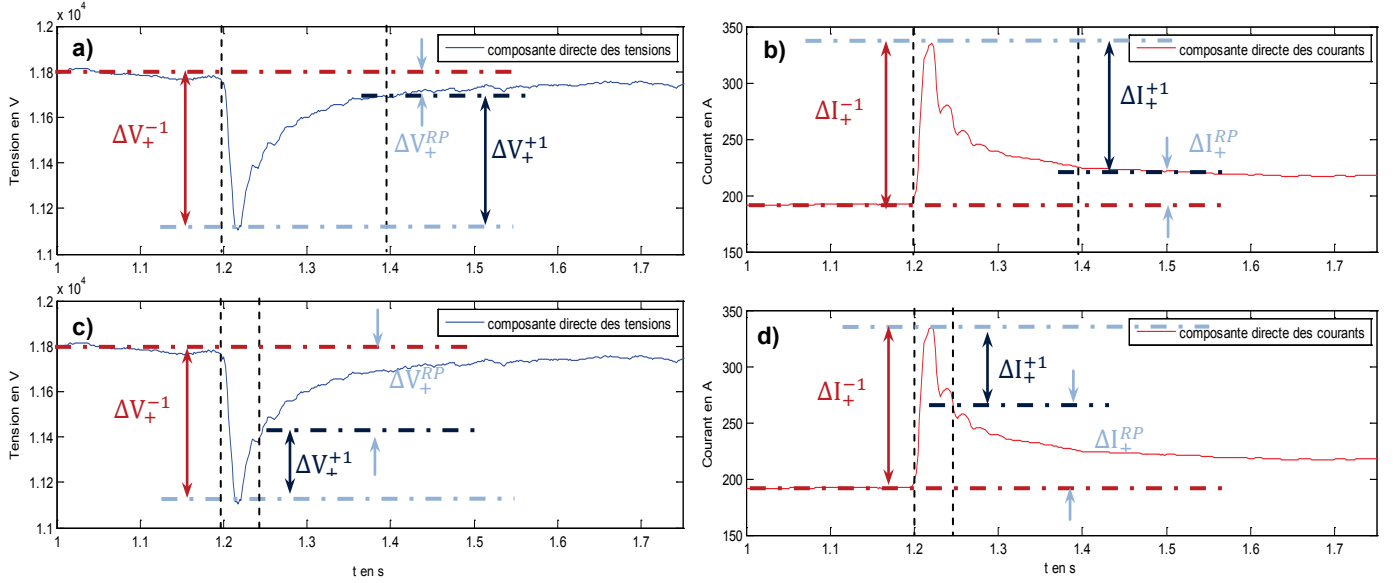
Pour limiter l'impact de cette variabilité, on choisit d'utiliser deux types d'intervalles d'observation  $I$  distincts pour calculer les indicateurs analysant les variations locales (Figure 14-2) :

1. Le 1<sup>er</sup> intervalle correspond au *segment transitoire original*, c'est-à-dire à celui fourni par l'algorithme de segmentation. Il est destiné à caractériser les régimes transitoires des défauts et des enclenchements de batteries de compensation.
2. Le 2<sup>nd</sup> intervalle est un *segment plus étendu*. Sa durée est fixe et égale à plusieurs périodes du signal. Il est destiné à caractériser les enclenchements de départs. Le choix d'un intervalle constant permet une meilleure exploitation du contenu du transitoire car il rend les indicateurs indépendants de la durée du transitoire fourni par la segmentation. La caractérisation obtenue est donc plus robuste.

Toutefois, afin de tenir compte du contexte des perturbations, sa taille est modulée en fonction des instants d'apparition des transitoires détectés par la méthode de segmentation. Si un nouveau régime transitoire survient avant la fin de l'intervalle d'observation, ce dernier est raccourci afin de ne pas être perturbé par la nouvelle évolution des formes d'onde. Il s'achève à l'instant signalant l'apparition du régime transitoire suivant.

L'utilisation des deux intervalles n'est pas automatique. Suivant le type de grandeurs analysées et les perturbations visées par l'indicateur, seul un des deux intervalles peut être utilisé. Pour chaque indicateur présenté dans ce chapitre, leur mise en œuvre est clairement spécifiée.

Dans ce manuscrit, plusieurs indicateurs de chaque type sont présentés pour caractériser les régimes transitoires des perturbations.



**Figure 14-2 – Variations des composantes directes des tensions et des courants calculées sur le segment transitoire fourni par l'intervalle étendu (a&b) et par l'algorithme de segmentation adaptatif (c&d)**

### 14.2.2. Analyse des composantes symétriques

Toutes les classes d'évènements recherchées par le système induisent des variations sur au moins une des composantes symétriques des tensions et des courants. Leur analyse est donc riche en informations quelle que soit la perturbation mesurée.

Pour exploiter le comportement des composantes directes des tensions et des courants, les trois types de variations précédemment définies sont utilisés (14-2). Par contre, pour les composantes inverses et homopolaires, seuls deux indicateurs sont calculés (14-3). Les variations observées entre les deux régimes permanents successifs ne sont pas exploitées, car elles ne sont pas révélatrices de la nature des perturbations. Elles dépendent plus du nouvel état atteint par le réseau que de la perturbation elle-même. Par exemple, la connexion d'un départ peut améliorer ou détériorer le facteur de déséquilibre global du réseau selon la valeur de son propre déséquilibre.

$$\begin{aligned} \Delta X_+^{-1} &= \text{extremum}_{t \in [t_0, t_0+I]} (X_+(t) - X_+(RP_{-1}^0)) \\ \Delta X_+^{+1} &= \text{extremum}_{t \in [t_0, t_0+I]} (X_+(t) - X_+(RP_{+1}^0)) \\ \Delta X_+^{RP} &= X_+(RP_{-1}^0) - X_+(RP_{+1}^0) \end{aligned} \quad (14-2)$$

Où :  $[t_0, t_0 + I]$  intervalle d'observation des variations.  
X est soit la tension, soit le courant.

$$\begin{cases} \Delta X_-^{-1} = \text{extremum}_{t \in [t_0, t_0+I]} (X_-(t) - X_-(RP_{-1}^0)) \\ \Delta X_-^{+1} = \text{extremum}_{t \in [t_0, t_0+I]} (X_-(t) - X_-(RP_{+1}^0)) \end{cases} \quad \begin{cases} \Delta X_0^{-1} = \text{extremum}_{t \in [t_0, t_0+I]} (X_0(t) - X_0(RP_{-1}^0)) \\ \Delta X_0^{+1} = \text{extremum}_{t \in [t_0, t_0+I]} (X_0(t) - X_0(RP_{+1}^0)) \end{cases} \quad (14-3)$$



On notera que les variations calculées pour la tension sont normalisées par rapport à la tension nominale calculée à partir du dernier intervalle permanent sans défaut. L'équivalent n'existant pas pour les courants, ce sont leurs variations simples, exprimées en Ampère, qui sont utilisées.

L'analyse des composantes symétriques est utilisée pour caractériser le comportement des perturbations de l'ensemble du panel d'événements. Pour exploiter leurs variations, deux catégories d'indicateurs sont définies, une par type d'intervalles d'observation présentés précédemment (Figure 14-2).

### 14.2.3. Analyse des puissances réactives

L'analyse des puissances réactives mesurées sur le réseau fournit également de nombreuses informations sur les perturbations. A la suite d'enclenchements de départs ou de connexions de batteries de compensation, d'importantes variations sont observées sur ces grandeurs. Elles sont dues aux fortes composantes inductives ou capacitives de ces composants.

Pour tirer un maximum d'informations de leur comportement, les puissances réactives sont exploitées de manière semblable aux composantes symétriques, c'est-à-dire que les trois indicateurs de variation sont déterminés pour chaque couple tension-courant (14-4). Leurs valeurs sont soit utilisées directement, soit comparées pour vérifier l'équilibre des trois phases.

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta Q_k^{-1} = \underset{t \in [t_0, t_0+I]}{\text{extremum}}(Q_k(t) - Q_k(RP_{-1}^0)) \\ \Delta Q_k^{+1} = \underset{t \in [t_0, t_0+I]}{\text{extremum}}(Q_k(t) - Q_k(RP_{+1}^0)) \\ \Delta Q_k^{RP} = Q_k(RP_{-1}^0) - Q_k(RP_{+1}^0) \end{array} \right. \quad \text{Avec : } k = \{a, b, c\} \quad (14-4)$$

Comme les indicateurs précédents, ils sont destinés à renseigner sur l'ensemble des perturbations transitoires recherchées. Ils sont donc calculés sur les *deux intervalles d'observation*. L'intervalle correspondant au transitoire identifié par l'algorithme de segmentation est destiné à caractériser les enclenchements de batteries de condensateurs et les défauts. L'intervalle étendu est, pour sa part, assigné aux perturbations causées par les enclenchements de départs.

Des indicateurs portant sur les variations du facteur de puissance au point d'observation ( $\tan \varphi$ ) sont utilisés de manière similaire. Ses variations observées entre les régimes  $RP_{-1}^0$  et  $RP_{+1}^0$  ne sont, par contre, pas déterminées lorsque l'intervalle étendu est utilisé comme base d'observation. Dans ces conditions, elles ne sont pas révélatrices de la perturbation mais dépendent plutôt des caractéristiques de certains composants du réseau. Par exemple, le facteur de puissance global d'un réseau à la suite du réenclenchement d'un départ évolue en fonction des charges du départ réenclenché : elles contribuent à le diminuer si le facteur de puissance du départ réenclenché est plus faible que celui du reste du réseau, et inversement.

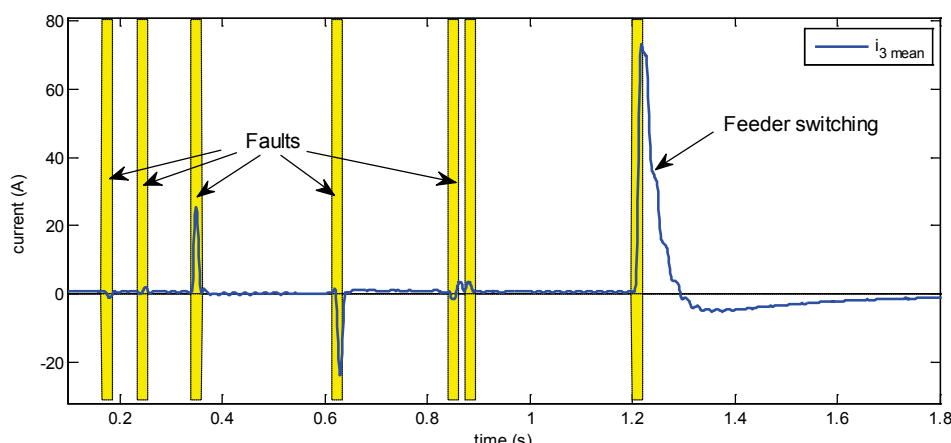
### 14.2.4. Analyse des valeurs moyennes

Le comportement des valeurs moyennes relevé au cours des transitoires des perturbations est utilisé pour mettre en évidence la présence d'une composante continue dans les formes d'onde. De telles composantes apparaissent à la suite de l'enclenchement d'un départ ou d'un transformateur. Elles sont propres à cette famille d'évènements. Elles ont pour origine la saturation des noyaux magnétiques des transformateurs HTA/BT se trouvant dans les postes de livraison sur le départ réenclenché.

Si l'amplitude de cette composante est faible et peu représentative pour les tensions, elle présente un comportement spécifique parfaitement exploitable pour les courants (Figure 14-3). Ce comportement est quantifié par deux indicateurs portant sur les variations extrémales observées au cours du transitoire (14-5). La variation observée entre les deux régimes permanents encadrant le transitoire  $RP_{-1}^0$  et  $RP_{+1}^0$  n'est pas utilisée car elle n'est pas caractéristique des perturbations. Elle dépend directement des changements de la distribution du bruit du signal ainsi que de la bonne synchronisation de la largeur de calcul de la moyenne avec sa fréquence fondamentale. Elle est également parasitée dans le cas où un régime établi n'est pas parfaitement atteint à la fin de l'intervalle d'observation.

$$\begin{cases} \Delta I_{MoyT\ k}^{-1} = \max_{t \in [t_0 + 1.5T_0, t_0 + I]} |I_{MoyT\ k}(t) - I_{MoyT\ k}(RP_{-1}^0)| \\ \Delta I_{MoyT\ k}^{+1} = \max_{t \in [t_0 + 1.5T_0, t_0 + I]} |I_{MoyT\ k}(t) - I_{MoyT\ k}(RP_{+1}^0)| \end{cases} \quad \text{Avec : } k = \{a, b, c\} \quad (14-5)$$

Ces deux indicateurs sont dédiés à la caractérisation des dissymétries transitoires observées lors de certains phénomènes électrotechniques, c'est-à-dire les perturbations causées par des enclenchements de charges saturables. En raison de cette spécificité, *seul l'intervalle d'observation étendu est utilisé* pour leur calcul.

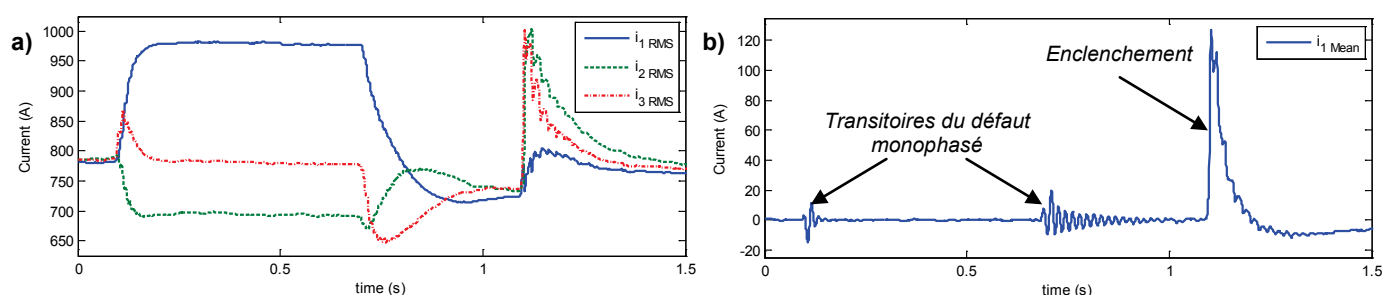


**Figure 14-3 – Illustration du comportement de la valeur moyenne en présence de défauts et de l'enclenchement d'un départ**

**La zone en jaune représente l'intervalle de variation *non pris en compte* lors du calcul de l'indicateur (1 période et demie suivant l'apparition du transitoire)**

Un 3<sup>e</sup> type d'indicateurs est utilisé pour discriminer les transitoires des défauts monophasés apparaissant sur les réseaux compensés de ceux induits par les enclenchements de départs. Ces défauts ont une dynamique plus lente que les autres familles de défauts. Cette caractéristique se répercute sur la valeur moyenne sous la forme d'une oscillation régulière qui est due à la composante sinusoïdale amortie de basse fréquence caractéristique des transitoires d'apparition et d'extinction du défaut (Figure 14-4-b) [BER95, FER95]. Afin de distinguer les deux familles de perturbations, on emploie un type d'indicateurs supplémentaire portant sur la différence des valeurs extrémales de la valeur moyenne observées au cours du régime transitoire (14-6). Comme les indicateurs précédents, il est calculé sur l'intervalle étendu.

$$\Delta I_{MoyT k}^{var} = \max_{t \in [t_0 + 1.5T_0, t_0 + I]} I_{MoyT k}(t) - \min_{t \in [t_0 + 1.5T_0, t_0 + I]} I_{MoyT k}(t) \quad \text{Avec : } k = \{a, b, c\} \quad (14-6)$$



**Figure 14-4 – Comportement de la valeur moyenne en présence de défauts monophasés**

a) Valeurs efficaces des courants

b) Valeur moyenne du courant de la phase 1

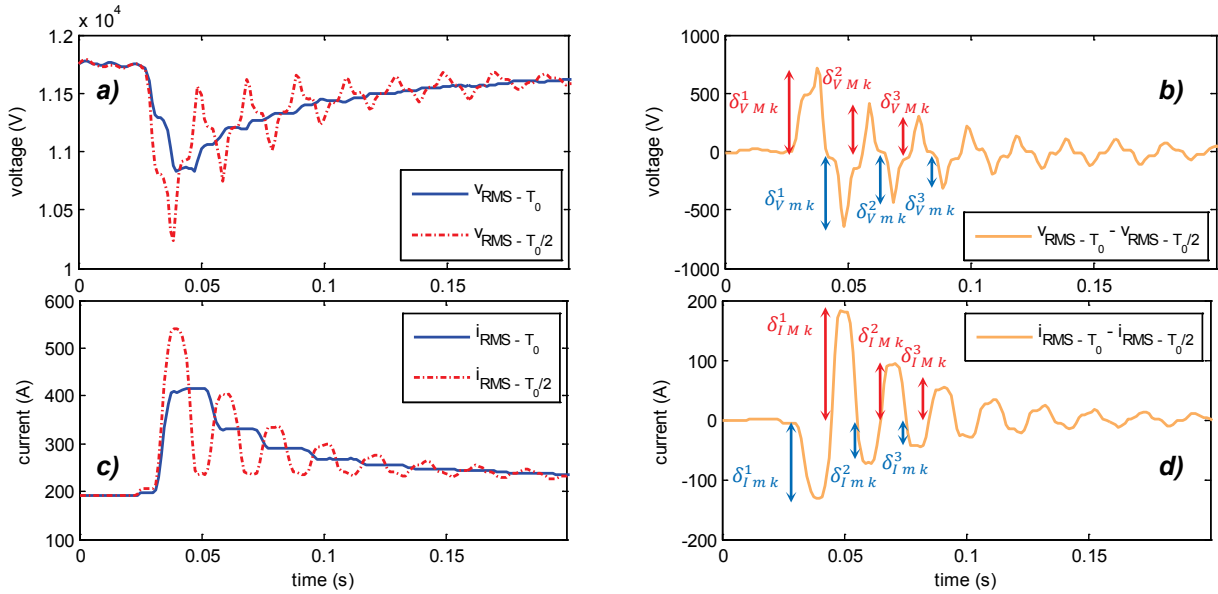
Pour ces trois types d'indicateurs, l'intervalle étendu est adapté de manière à tenir compte des particularités de la grandeur analysée. En effet, une variation de la valeur moyenne est observée localement pour tous les types de transitoires. Pour les transitoires rapides, comme ceux des défauts, cette variation est prépondérante au cours de la 1<sup>re</sup> période suivant l'apparition du transitoire (Figure 14-3). Cette durée correspond au temps de réponse du calcul de la valeur moyenne. Il est nécessaire que cette variation n'apparaisse pas dans la valeur de l'indicateur pour que la caractérisation des perturbations causées par des enclenchements de départs ne soit pas affectée. On choisit de faire débuter l'intervalle d'observation avec un retard sur l'instant d'apparition du transitoire supérieur à son temps de réponse, c'est-à-dire supérieur à  $t_0 + T_0$ . La durée d'une période et demie ( $3T_0/2$ ) choisie joue le rôle de marge de sécurité vis-à-vis du calcul de l'indicateur.

#### 14.2.5. Analyse des valeurs efficaces calculées sur une base $T_0/2$

Les enclenchements de départs sont marqués par la saturation des noyaux magnétiques des transformateurs de livraison HTA/BT qui sont situés en aval du point de connexion du départ. Ce phénomène de saturation est à l'origine de la présence d'un fort taux d'harmoniques de rangs pairs dans les formes d'onde des tensions et des courants. Cette caractéristique est typique de ce type

d'événements. Elle peut être mise en évidence par l'évaluation des harmoniques présents dans le signal pendant le transitoire. Mais la répartition de l'énergie harmonique entre les différents rangs étant très variable, cette information est difficilement exploitable.

Pour faciliter la reconnaissance des perturbations causées par les enclenchements de départs, une grandeur particulière  $\delta_{Xk}$ , capable d'isoler un comportement caractéristique des phénomènes de saturation magnétique, a été développée. Elle résulte de la comparaison des valeurs efficaces des tensions et des courants calculées sur deux fenêtres d'observation glissantes de tailles différentes (14-7) : une fenêtre de largeur égale à une période  $T_0$  ( $Eff_T$ ) et une de taille réduite d'une demi-période  $T_0/2$  ( $Eff_{T/2}$ ). On note que la valeur efficace déterminée avec le 2<sup>nd</sup> mode de calcul est sensible à la présence de la totalité des harmoniques de rangs pairs [WAN04]. Un comportement oscillatoire y apparaît sur les intervalles de saturation magnétique (Figure 14-5-a et -c).

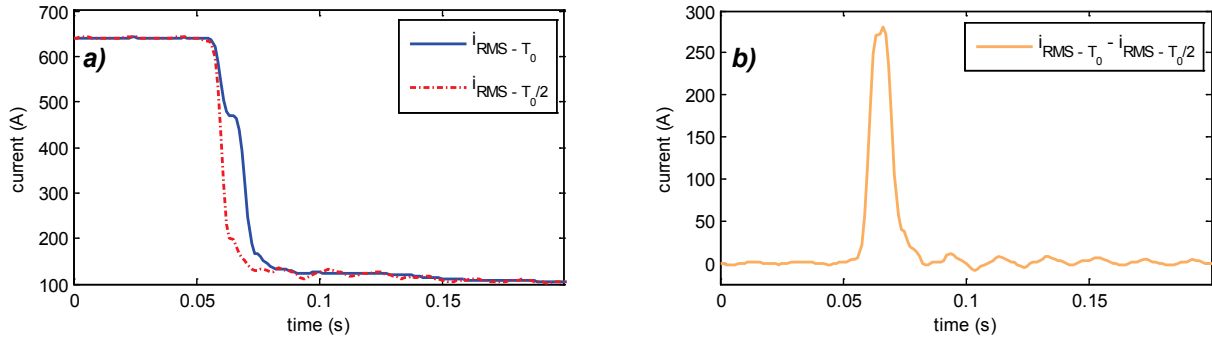


**Figure 14-5 – Evolution de l'écart des valeurs efficaces des tensions simples et des courants de ligne lors d'un enclenchement de départ**

Le calcul de la différence entre les deux évaluations de la valeur efficace permet d'isoler l'oscillation amortie caractéristique des phénomènes de saturation. En régime permanent, la différence entre ces deux valeurs reste faible. Par contre, en présence d'enclenchements de transformateurs, un comportement oscillatoire amorti d'amplitude importante apparaît sur les valeurs efficaces des tensions et des courants évaluées sur une base  $T_0/2$  (Figure 14-5-b et -d).

$$\delta_{Xk} = X_{k\text{Eff}_T} - X_{k\text{Eff}_{T/2}} \quad \text{Où : } k = \{a, b, c\} \quad (14-7)$$

La grandeur  $\delta_{Xk}$  permet de quantifier l'amplitude de la composante oscillatoire amortie causée par la saturation magnétique et de vérifier la décroissance de son enveloppe. Ces deux caractéristiques sont très différentes de celles observées en présence de transitoires de défauts (Figure 14-6).



**Figure 14-6 – Evolution de l'écart des valeurs efficaces d'un courant de ligne pendant le transitoire d'apparition d'un défaut biphasé**

Afin de tester ces propriétés, on définit plusieurs indicateurs étudiant le comportement des minima  $\delta_{Xmk}^i$  et des maxima  $\delta_{X Mk}^i$  de l'écart  $\delta_{Xk}$  des valeurs efficaces de la grandeur  $X$ . Ces deux quantités sont évaluées tous les intervalles de largeur  $T_0$  à partir de l'instant de détection du transitoire (14-8). Elles vérifient la présence d'oscillations et quantifient leur amplitude. Deux indicateurs supplémentaires ( $\Delta_{X Mk}^i$  et  $\Delta_{X mk}^i$ ) analysent le comportement des enveloppes en comparant les valeurs prises par  $\delta_{Xmk}^i$  et  $\delta_{X Mk}^i$  sur deux périodes successives.

$$\begin{aligned} \delta_{X Mk}^i &= \max_{T_i}(\delta_{Xk}) & \delta_{X mk}^i &= \min_{T_i}(\delta_{Xk}) \\ \Delta_{X Mk}^i &= \delta_{X Mk}^i - \delta_{X Mk}^{i-1} & \Delta_{X mk}^i &= \delta_{X mk}^i - \delta_{X mk}^{i-1} \end{aligned} \quad \text{Où : } k = \{a, b, c\} \quad (14-8)$$

Où :  $T_i$  est la  $i^{\text{me}}$  période suivant l'enclenchement

Comme ces indicateurs sont dédiés aux enclenchements de départs, seul l'intervalle d'observation étendu est utilisé pour observer et caractériser le comportement oscillatoire décroissant de la différence des valeurs efficaces. Comme précédemment, sa taille est modulable en fonction des instants d'apparition de transitoires : celle-ci est réduite si un transitoire survient avant la fin du temps d'observation.

On notera que la différence des deux valeurs efficaces peut présenter un faible comportement oscillatoire en régime permanent sans défaut (Figure 14-6-b). Cette oscillation est causée par plusieurs phénomènes résultant à la fois d'erreurs de mesure et d'imprécisions des traitements : l'erreur d'estimation de la fréquence fondamentale du signal, la désynchronisation entre la fréquence d'échantillonnage et celle de la forme d'onde, la présence d'un offset dans le capteur de mesure... Une estimation fiable de la fréquence fondamentale et le rééchantillonnage du signal limitent les erreurs de caractérisation des perturbations fournies par ces indicateurs.

#### 14.2.6. Analyse des formes d'onde par filtrage anti-harmoniques

La caractérisation des perturbations haute fréquence de courte durée comme celles générées par les enclenchements de batteries de condensateurs est difficile, car les informations contenues dans les

transitoires des formes d'onde sont très localisées. Les grandeurs électrotechniques classiques comme les valeurs efficaces ou les composantes symétriques sont incapables de fournir des caractéristiques précises du transitoire en raison de leur fort effet passe-bas. Une solution numériquement coûteuse consiste à faire appel à des méthodes d'analyse temps-fréquence ou d'estimation paramétrique. L'application de telles méthodes à tous les segments transitoires est difficilement envisageable en raison de leur coût. Nous proposons une méthode alternative consistant à analyser les signaux résultant du filtrage anti-harmoniques des formes d'onde.

### **Filtrage anti-harmoniques des formes d'onde**

Une grandeur telle que la valeur crête des formes d'onde possède une réactivité suffisante mais présente un inconvénient majeur : deux oscillations amorties de même amplitude sont caractérisées différemment selon la position de l'instant d'enclenchement sur la forme d'onde. La Figure 14-7-a illustre cette problématique. Lorsque l'instant d'enclenchement est proche du maximum de la tension, d'importantes variations apparaissent, alors que les variations de l'indicateur restent très faibles pour un enclenchement à proximité du zéro de tension.

Pour s'affranchir de ce problème, on applique préalablement un filtre anti-harmoniques aux formes d'onde analysées (14-9). De par sa conception, ce filtre sépare le fondamental et les composantes harmoniques permanentes des composantes fréquentielles transitoires contenues dans le signal analysé.

$$y(k) = x(k) - x(k - \tau)$$

Où :  $\tau = n T_0$  est le retard du filtre

**(14-9)**

Le filtre anti-harmoniques utilisé pour extraire ces transitoires est différent de ceux employés en Partie 2 pour la segmentation des perturbations. Ces filtres ont un faible temps de réponse qui leur permet de détecter des transitoires rapprochés. Pour la caractérisation des perturbations transitoires, une telle propriété n'est pas souhaitée. L'intervalle d'observation du transitoire étant limité par la période de répétition du filtre anti-harmoniques (Figure 14-7-b), un filtre avec un retard d'une période ou d'une demi-période est trop restrictif pour permettre une caractérisation fiable des signaux filtrés.

On choisit d'utiliser un filtre dont le retard est égal à deux périodes (Figure 14-7-b). Cet élargissement requiert toutefois que les formes d'onde soient en régime permanent avant l'apparition du transitoire de la perturbation sur un intervalle dont la taille est égale au retard du filtre. L'emploi d'une valeur plus importante présente peu d'intérêt car l'essentiel des informations est localisé au cours des premiers instants suivant l'apparition de la perturbation. Son champ d'applications serait également plus limité car la présence d'un régime permanent suffisant n'est pas garantie en présence de transitoires proches.

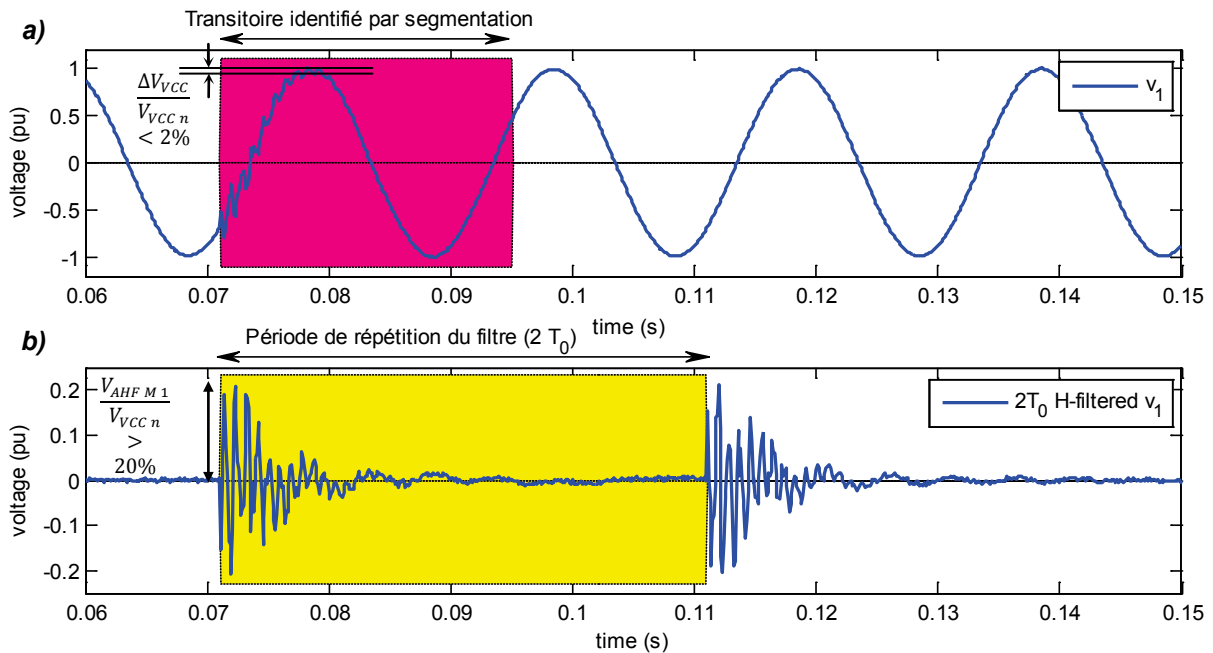


Figure 14-7 – Analyse de la forme d'onde d'une tension simple par filtrage anti-harmoniques

### Caractéristiques de la perturbation d'enclenchement

Le filtrage des formes d'onde extrait le transitoire de la perturbation et rend le signal déterminé facilement exploitable (Figure 14-7-b). L'amplitude de la composante sinusoïdale amortie principale peut être directement estimée et la décroissance de son enveloppe vérifiée.

Cette dernière information est particulièrement discriminante par rapport aux perturbations causées par des défauts (Figure 14-8). L'enveloppe est déterminée par calcul de la valeur efficace du signal filtré sur une fenêtre glissante de taille égale à une demi-période ( $T_0/2$ ). Cette taille de la fenêtre d'intégration est choisie afin de limiter le temps de réponse du calcul de l'énergie du signal. Elle permet d'observer la décroissance de l'enveloppe sur un intervalle égal à une période et demie. La différence des valeurs obtenues entre le début et la fin de cet intervalle permet d'évaluer cette décroissance (14-10).

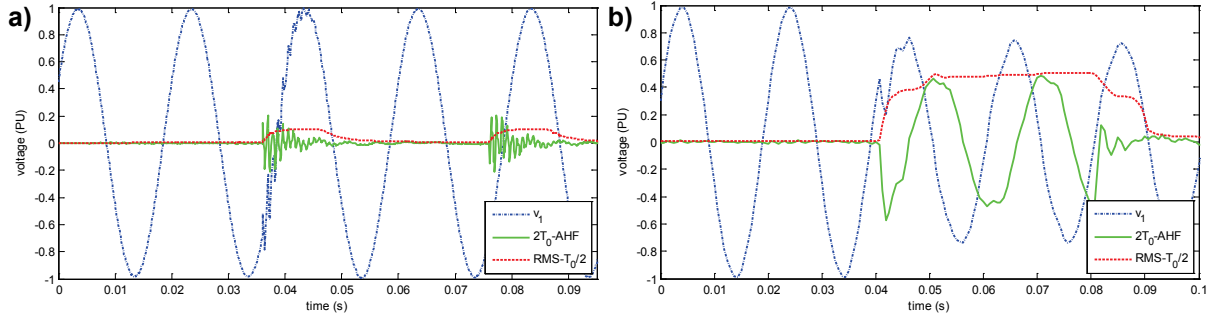
$$\begin{cases} X_{AHF Mk} = \max_{t \in [t_0, t_0 + T_0]} |X_{AHF k}(t)| \\ \Delta EX_k = EX_{AHF k}(t_0 + 2T_0) - EX_{AHF k}\left(t_0 + \frac{T_0}{2}\right) \end{cases} \quad \text{Où : } k = \{a, b, c\} \quad (14-10)$$

Où :  $X_{AHF k}$  est la grandeur  $X$  (tension ou courant) de la phase  $k$  après filtrage anti-harmoniques  
 $EX_{AHF k}$  est la valeur efficace calculée sur une base  $T_0/2$  de la tension ou du courant filtré

Deux intervalles d'observations sont utilisés pour calculer ces grandeurs. Ils sont différents de ceux employés pour analyser le comportement des composantes symétriques ou de la valeur moyenne, car les grandeurs qu'ils traitent ont une dynamique très particulière :

- ✓ Le 1<sup>er</sup> analyse les valeurs extrémales du signal filtré sur la 1<sup>re</sup> période suivant l'instant de détection du transitoire.

- ✓ Le 2<sup>nd</sup> étudie le comportement de l'enveloppe du signal filtré. L'intervalle exploitable dépend à la fois du temps de réponse de la valeur efficace et de la fréquence de répétition du filtre anti-harmoniques. Il débute une demi-période après l'instant de détection du transitoire et s'achève deux périodes après.



**Figure 14-8 – Comportement des indicateurs en présence d'un enclenchement de batterie de condensateurs (a) et d'un défaut (b)**

#### Estimation de la direction de la batterie responsable de la perturbation

Les signaux obtenus par filtrage anti-harmoniques des tensions et des courants sont également utilisés pour déterminer la direction de la batterie de condensateurs responsable du phénomène d'enclenchement. Cette information est contenue dans le comportement des oscillations amorties observées à l'instant de l'enclenchement [HUR08, SAI04]. Elle peut être difficilement déterminée à partir des formes d'onde car les perturbations permanentes de type harmoniques et bruit diminuent fortement la fiabilité de l'information obtenue (Figure 14-9–a). Cette imprécision est amplifiée quand l'amplitude des perturbations est limitée.

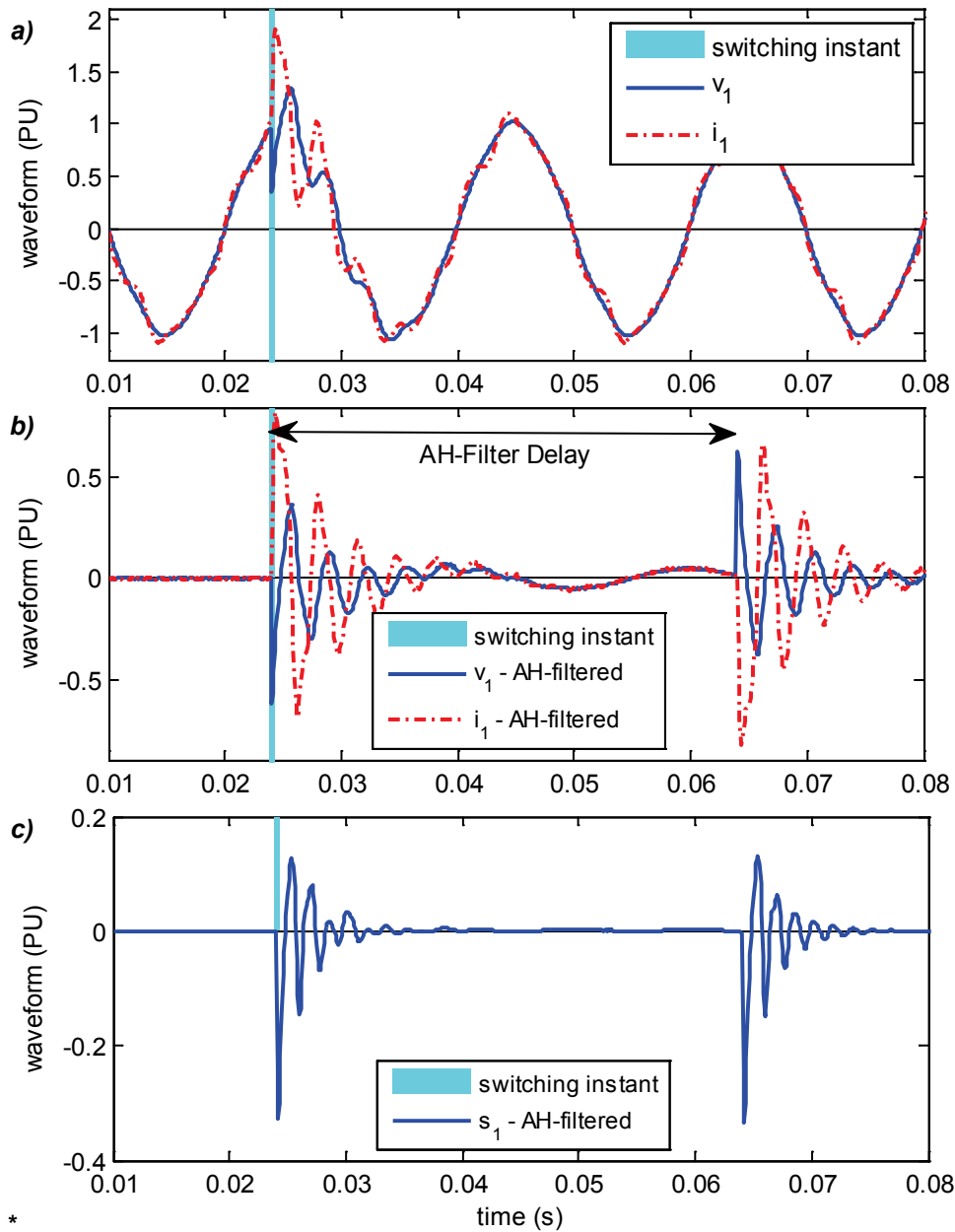
Le filtrage anti-harmoniques de ces formes d'onde extrait facilement les informations recherchées car il conserve les propriétés spectrales des composantes transitoires (Figure 14-9–b). L'information de direction se retrouve intégralement dans ces signaux et son exploitation est beaucoup plus aisée. La multiplication phase à phase des formes d'onde des tensions et des courants filtrés (Figure 14-9–c) présente un comportement sinusoïdal amorti à haute fréquence. La valeur de son maximum local  $peak(s_j)$  après l'enclenchement, et en particulier son signe, sont utilisés pour caractériser la direction (14-11) [CAU11a].

$$\begin{cases} peak(s_j) > 0, \text{ batterie de condensateurs en amont} \\ peak(s_j) < 0, \text{ batterie de condensateurs en aval} \end{cases} \quad \text{Où : } j = \{a, b, c\} \quad (14-11)$$

Avec :  $v_{AHF j}(\cdot)$  et  $i_{AHF j}(\cdot)$  sont les signaux obtenus après filtrage anti-harmoniques des formes d'onde des tensions  $v_j$  et des courants  $i_j$

$s_j(k) = v_{AHF j}(k) \cdot i_{AHF j}(k)$  est la puissance instantanée des signaux de tension et de courant filtrés





**Figure 14-9 – Extraction de l'information de direction des formes d'onde d'un enclenchement de batteries de condensateurs de compensation**

- a) Formes d'onde d'une tension et d'un courant      b) Signaux après filtrage anti-harmoniques  
c) Puissance instantanée des tensions et courants filtrés ( $s_k(t) = v_{AHF\ k}(t) \cdot i_{AHF\ k}(t)$ ,  $k \in \{a, b, c\}$ )

### 14.3. Identification de modèles comportementaux

Les informations déterminées par les indicateurs analysant les variations locales permettent une caractérisation relativement aboutie des perturbations. Elles sont parfois insuffisantes pour une identification fiable, car des fausses identifications peuvent survenir. Par exemple, des perturbations d'enclenchement sont reconnues dans certains cas en présence de transitoires de défauts.

Afin d'affiner les informations précédemment déterminées, des indicateurs basés sur les paramètres de modèles comportementaux sont calculés. Deux modèles distincts sont utilisés. Ils sont sélectionnés pour leur cohérence vis-à-vis des types de perturbations recherchées.

- ✓ Le modèle exponentiel est destiné à caractériser le comportement de certaines grandeurs électrotechniques pendant les perturbations causées par des enclenchements de départs.
- ✓ Le modèle sinusoïdal amorti est dédié à l'analyse des perturbations provoquées par les enclenchements de batteries de condensateurs. Ce modèle est également appliqué aux transitoires des défauts monophasés survenant sur les réseaux compensés.

Si les renseignements fournis par ces indicateurs sont plus précis, ils ont l'inconvénient d'être algorithmiquement plus complexes. Ceci peut s'avérer problématique dans un contexte d'analyse des perturbations en quasi-temps-réel. En raison de leur coût, il est difficilement envisageable de tous les calculer chaque fois qu'un transitoire est détecté. C'est pour cette raison que l'on identifie les comportements transitoires en deux étapes distinctes : une étape d'orientation et une de raffinement. Dans un premier temps, les indicateurs exploitant les variations locales sont calculés et analysés. Le résultat de cette 1<sup>re</sup> discrimination est utilisé pour orienter la recherche et restreindre le nombre d'indicateurs à calculer, c'est-à-dire d'ajustements de modèles à effectuer. Le nombre d'erreurs d'estimation est réduit, car le traitement n'a pas à ajuster les indicateurs d'un modèle qui n'est manifestement pas vérifié par la perturbation. Ainsi, un comportement sinusoïdal amorti ne sera pas cherché en présence d'enclenchements de départs.

L'intégration de ces deux étapes au sein du système de reconnaissance est détaillée au Chapitre 17.

### 14.3.1. Modèle comportemental exponentiel

#### Paramètres du modèle

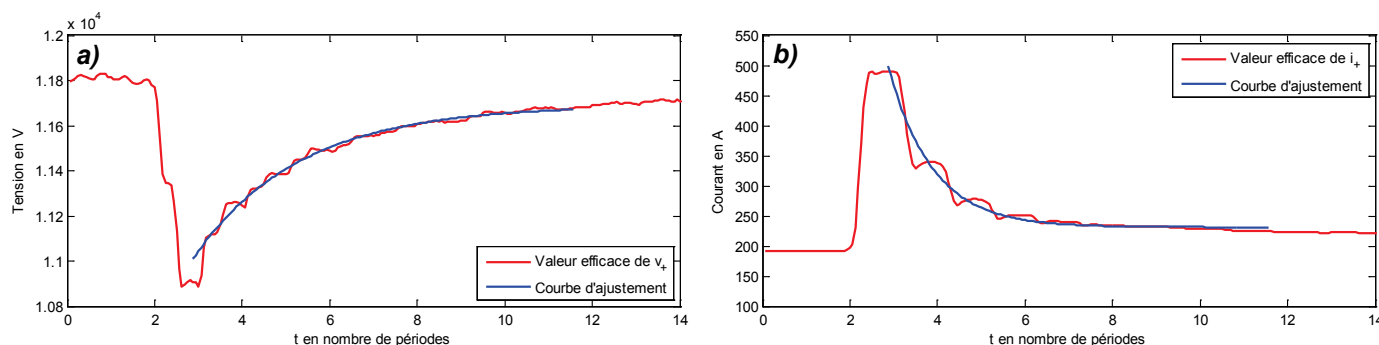
Les perturbations causées par les enclenchements de départs sont caractérisées par un unique transitoire lent à la fin duquel un nouveau régime permanent est établi [BOL06]. L'analyse de ce transitoire montre que le comportement de plusieurs grandeurs électrotechniques peut y être approximé par un modèle exponentiel (14-12). L'ajustement de ses paramètres aux composantes directes des tensions et des courants donne accès à plusieurs informations. Le procédé d'estimation utilise une méthode des moindres carrés pour analyser les données mesurées sur l'intervalle d'observation considéré.

$$y = c e^{-\alpha t} + d \quad (14-12)$$

Trois indicateurs exploitent les informations fournies par les paramètres du modèle (14-13). Ils concernent l'amplitude du saut à l'enclenchement ( $\Delta X_{Mod\ k}^{-1}$ ), le taux de décroissance ( $\Delta X_{Mod\ k}^{\alpha}$ ) et la variation ( $\Delta X_{Mod\ k}^{RP}$ ) observée entre les deux régimes de fonctionnement stable qui encadrent le transitoire d'enclenchement.

$$\begin{cases} \Delta X_{Mod\ k}^{-1} = c + d \\ \Delta X_{Mod\ k}^{\alpha} = \alpha \\ \Delta X_{Mod\ k}^{RP} = d \end{cases} \quad \text{Où : } k = \{a, b, c\} \quad (14-13)$$

Dans notre système de reconnaissance, les composantes directes ne sont pas les seules grandeurs analysées par de telles méthodes d'ajustement. Le comportement transitoire des puissances réactives est analysé de manière similaire.



**Figure 14-10 – Ajustement de courbe par un modèle exponentiel du 1<sup>er</sup> ordre sur les composantes directes des tensions (a) et des courants (b)**

### Intervalles d'observation

Les indicateurs analysant les coefficients des modèles comportementaux exponentiels sont essentiellement destinés aux enclenchements de transformateurs. L'intervalle d'observation utilisé pour réaliser son ajustement doit être suffisant pour observer le comportement exponentiel dans son ensemble. A cet effet, on utilise l'intervalle étendu défini au paragraphe précédent, c'est-à-dire un intervalle de taille fixe et égale à plusieurs périodes du fondamental. On rappelle que sa taille est modulée en fonction des temps d'apparition des transitoires : elle est réduite si un transitoire est détecté avant la fin du temps d'observation par défaut.

Le choix de l'instant du début de l'intervalle d'observation utilisé pour l'ajustement du modèle suit une problématique similaire à celle rencontrée lors de l'analyse des valeurs moyennes du courant vue au paragraphe 14.2.4. La méthode d'ajustement tient compte du temps de réponse du calcul de la grandeur analysée (composante symétrique ou puissance réactive) lors de la définition de l'intervalle d'observation. Il est d'une période  $T_0$  pour les traitements envisagés (Figure 14-10). La première période suivant l'apparition du transitoire ne doit pas apparaître dans l'intervalle d'observation, car le comportement exponentiel ne débute qu'après cet instant. Son inclusion fausserait fortement le résultat de l'identification paramétrique (§15.2.2). On choisit de faire débiter l'intervalle d'observation une période après l'instant de détection du transitoire.

### 14.3.2. Modèle comportemental sinusoïdal amorti

Les phénomènes d'enclenchements de batteries de condensateurs induisent des transitoires oscillatoires courts qui comportent des composantes fréquentielles élevées. À la fin de ce transitoire, un nouveau régime permanent est établi. L'analyse du comportement des formes d'onde au cours de ce type de transitoires montre que la perturbation générée est constituée d'une somme de sinusoïdes amorties se superposant aux formes d'onde de régime permanent. Lors de l'étape de caractérisation, ces transitoires sont approximés par un modèle de type sinusoïdal amorti.

Un tel comportement est également mis en évidence en présence de défauts monophasés sur les réseaux compensés. Les caractéristiques des composantes fréquentielles observées lors de ces transitoires sont par contre très différentes : la plage de variations des fréquences principales est proche du fondamental et leur durée varie de quelques périodes à plusieurs centaines de millisecondes.

Les indicateurs présentés dans ce paragraphe sont employés pour caractériser et quantifier les comportements transitoires de ces deux types de perturbations.

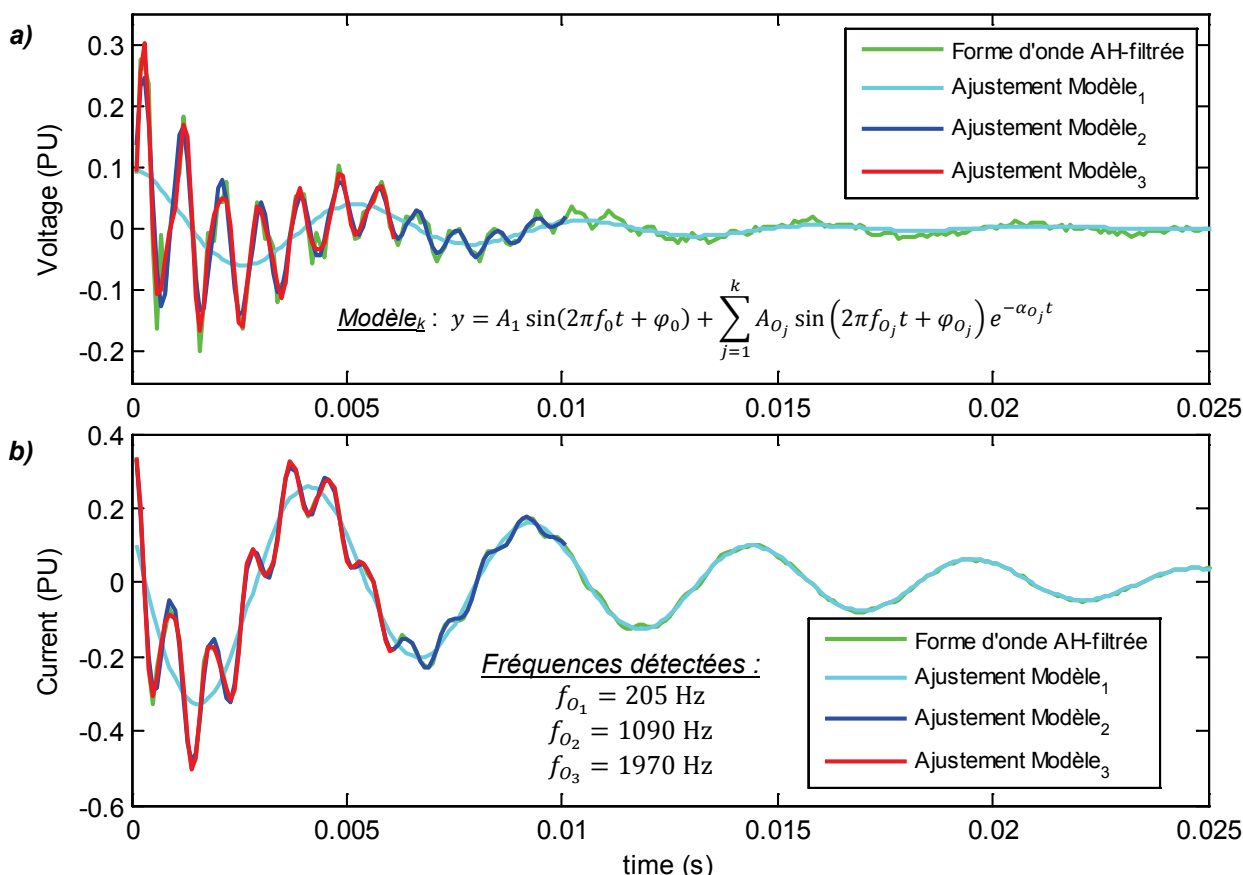
#### 14.3.2.1. Pré-traitement des formes d'onde

##### **Filtrage anti-harmoniques pour les enclenchements de batteries**

Les enclenchements de batteries de condensateurs sont des événements isolés présentant un contenu fréquentiel riche et très localisé (Figure 14-11). L'insertion de leur capacité dans le réseau modifie son impédance fréquentielle et affecte la distribution harmonique des formes d'onde. Les variations induites sont toutefois négligeables par rapport à l'amplitude des composantes fréquentielles transitoires observées lors de l'enclenchement.

Afin de faciliter l'estimation de ces composantes, il convient de simplifier au maximum le signal à analyser, c'est-à-dire de limiter le nombre de composantes spectrales non caractéristiques. À cet effet, un filtre anti-harmoniques (14-9) est employé. Il a l'avantage d'éliminer le fondamental et l'ensemble des composantes harmoniques de régime permanent du signal et de désensibiliser l'estimation des paramètres du modèle au THD de la forme d'onde. L'élimination préalable du fondamental et des fréquences harmoniques limite également l'ordre du modèle utilisé, facilite son estimation et réduit le coût algorithmique de la méthode d'ajustement.

Comme au paragraphe 14.2.6, on utilise un filtre anti-harmoniques dont le décalage  $\tau$  est égal à deux périodes ( $2T_0$ ). Ce choix augmente l'intervalle d'observation du transitoire et réduit la sensibilité de l'estimation du modèle sinusoïdal amorti aux erreurs de segmentation. Il suppose par contre que les formes d'onde se trouvent en régime permanent pendant une durée, équivalente au décalage  $\tau$  du filtre, avant que le transitoire n'apparaisse. Cette condition est généralement vérifiée pour cette catégorie d'événements puisqu'ils surviennent indépendamment des autres types de perturbations.



**Figure 14-11 – Ajustement des signaux déterminés par filtrage anti-harmoniques des formes d’onde d’une tension simple (a) et d’un courant de ligne (b)**  
(Evènement : l’enclenchement d’une batterie de condensateurs)

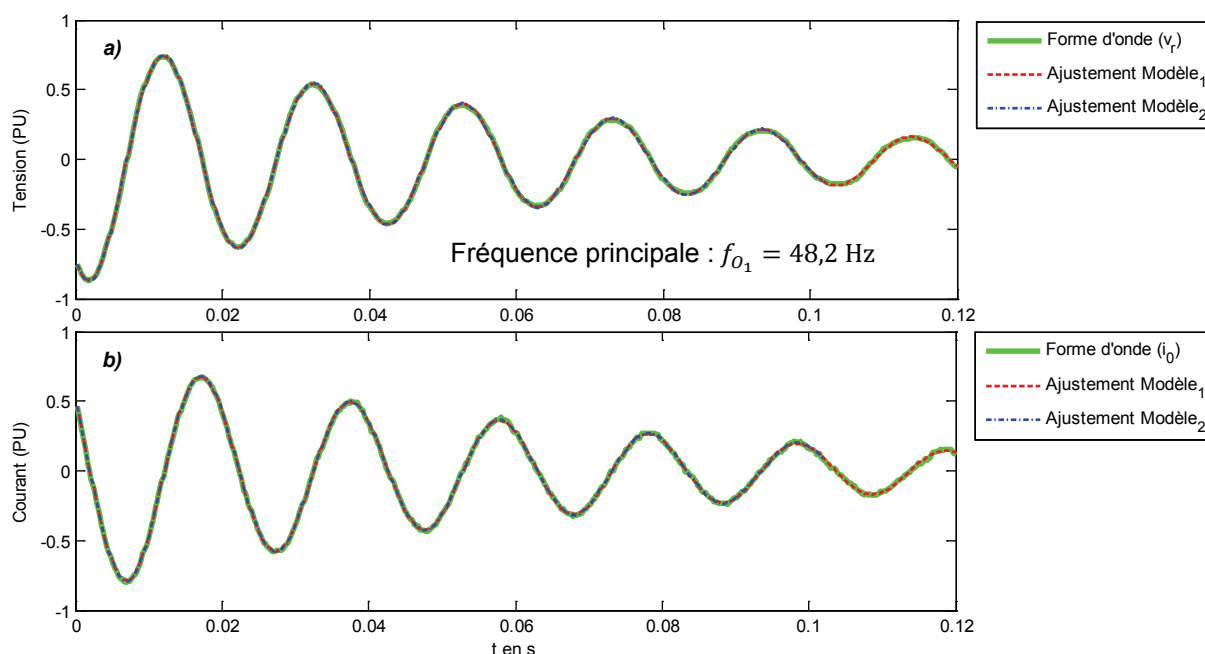
### Analyse directe des formes d’onde pour les défauts monophasés

Contrairement aux enclenchements de batteries, les défauts monophasés survenant sur les réseaux à neutre compensé sont rarement des évènements isolés. Il advient couramment que leurs transitoires d’apparition et de disparition ne soient pas séparés par un régime permanent. De plus, la durée et le contenu fréquentiel de ces transitoires sont très variables et dépendent fortement de la topologie et des caractéristiques du réseau. Dans ce contexte, un filtre anti-harmoniques est difficilement utilisable, car la stabilité du signal avant l’apparition de la perturbation n’est pas garantie.

Lors de l’étape de caractérisation, le comportement des transitoires des défauts monophasés est évalué directement à partir des formes d’onde de la tension homopolaire et du courant résiduel. Celles des tensions simples et des courants de lignes ne sont pas considérées.

Malgré l’absence de pré-traitement, aucune composante fréquentielle supplémentaire n’est intégrée au modèle. En effet, le spectre harmonique de ces signaux est généralement pauvre et les amplitudes des composantes amorties sont très supérieures à celles des harmoniques (Figure 14-12). Seule une composante harmonique de rang trois peut venir se superposer aux formes d’onde des tensions et

des courants homopolaires. Si son amplitude est importante, elle est généralement intégrée par l'un des degrés de liberté du modèle et affecte peu l'estimation. Une telle approximation ne serait pas valable si les formes d'onde des tensions simples et des courants de lignes étaient exploitées.



**Figure 14-12 – Ajustement des formes d'onde de la tension homopolaire (a) et du courant résiduel (b) sur le transitoire de disparition**

La réalisation d'un traitement différencié pour ces deux types de perturbations transitoires pose peu de problèmes puisque ces opérations sont déclenchées uniquement à l'issue de la première étape du système de reconnaissance (Chapitre 17). Pour la très grande majorité des cas, l'orientation déterminée restreint suffisamment l'ensemble des classes de perturbations pour n'avoir à effectuer qu'un seul des deux traitements.

### 14.3.2.2. Sélection du modèle paramétrique

La forme du modèle paramétrique utilisée pour ajuster le comportement des signaux analysés est similaire pour les deux types de perturbations considérées. Elle est indépendante du pré-traitement éventuel des formes d'onde car la richesse spectrale des signaux considérés – les formes d'onde des tensions simples et de courants de lignes après filtrage anti-harmoniques et les formes d'onde des tensions et courants résiduels – est similaire. Elle comporte deux parties : une partie harmonique décrivant les formes d'onde en régime permanent et une partie sinusoïdale amortie décrivant le comportement transitoire de la perturbation (14-14).

- ✓ La partie harmonique est réduite au seul fondamental. Il s'agit de la seule composante prépondérante dans le spectre des signaux analysés. Pour les défauts monophasés, elle est

présente dans leurs régimes permanents. Pour les enclenchements de batteries de condensateurs, l'atténuation du fondamental est variable. Elle dépend de la qualité de l'estimation de la fréquence fondamentale en raison de la problématique de synchronisation du filtre anti-harmoniques vue au paragraphe 7.3.1.4. La composante fondamentale résultante est généralement faible, mais elle risque de fausser le résultat de l'ajustement si elle venait à être négligée (Figure 14-13).

- ✓ La partie sinusoïdale amortie est constituée d'une à trois composantes fréquentielles oscillantes. L'ordre du modèle est augmenté à mesure que l'estimation des paramètres du modèle s'affine.

$$y = A_0 \sin(2\pi f_0 t + \varphi_0) + \sum_{j \in [1, P]} A_{O_j} \sin(2\pi f_{O_j} t + \varphi_{O_j}) e^{-\alpha_{O_j} t} \quad (14-14)$$

Où :  $O_j$  sont les  $P$  composantes oscillatoires du modèle

### 14.3.2.3. Estimation récursive du modèle

Les paramètres recherchés par la méthode d'estimation présentée dans ce manuscrit sont l'amplitude, la phase, la fréquence et l'amortissement des composantes transitoires du modèle (14-14). Ils permettent une caractérisation complète des transitoires oscillants. On rappelle que les données utilisées sont soit les formes d'onde brutes des tension et courant homopolaires, soit les signaux déterminés après l'application d'un filtre anti-harmoniques aux formes d'onde des tensions simples et des courants de lignes.

#### **Problématiques liées à l'estimation des paramètres du transitoire**

Différentes méthodes peuvent être employées pour estimer les composantes fréquentielles contenues dans les régimes transitoires des perturbations générées par les enclenchements de batteries de condensateurs et les défauts monophasés. Nous choisissons d'estimer les paramètres des formes d'onde analysées à l'aide d'une méthode d'ajustement dans le domaine temporel.

Cette méthode présente plusieurs avantages par rapport à des méthodes d'analyse spectrale telles que la FFT. Pour un échantillonnage et une fenêtre d'observation identiques, sa résolution fréquentielle est supérieure à celle du spectre de la FFT. Sa capacité à séparer des composantes fréquentielles spectralement proches est utile pour analyser les transitoires des défauts monophasés, car ils comportent une composante oscillatoire dont la fréquence est voisine de la fréquence fondamentale [FER95]. De plus, l'estimation par ajustement fournit une information supplémentaire essentielle à l'interprétation du comportement des formes d'onde, l'amortissement des composantes oscillatoires.

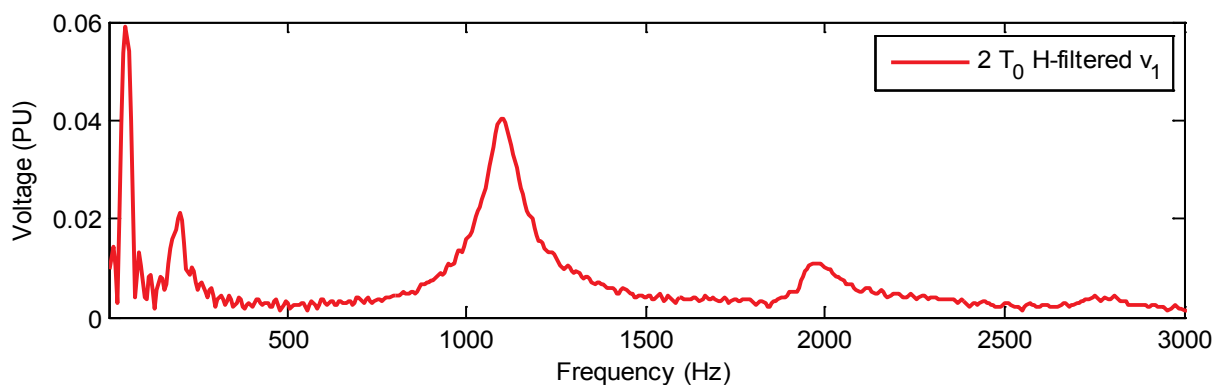
La méthode utilisée a par contre l'inconvénient d'être algorithmiquement plus complexe. Cette complexité a deux origines : elle est liée au processus d'estimation plus coûteux, mais également à la méthodologie mise en place pour traiter les minima locaux. Leur présence est inhérente aux problèmes d'estimation multi-variables tels que l'estimation des paramètres de composantes

oscillatoires amorties [KAY88]. Des précautions doivent être prises pour limiter leur impact car ils constituent une source d'erreurs importante. Sinon, l'évaluation des paramètres obtenue dépend fortement des conditions initiales choisies : lorsque celles-ci sont éloignées des paramètres réels du signal, les minima locaux ont tendance à attirer l'estimation.

Pour répondre à cette problématique, le processus utilisé initialise ses phases d'ajustement de sorte que la distance séparant le minimum global des conditions initiales soit minimale, et emploie une approche itérative faisant évoluer l'ordre du modèle, la taille de la fenêtre d'observation et la fréquence d'échantillonnage des données analysées.

### **Initialisation de l'estimation**

Pour les transitoires des enclenchements de batteries de condensateurs, les conditions initiales d'une partie des paramètres du modèle sont déterminées en calculant leur spectre par FFT (Figure 14-13). Les valeurs des amplitudes et les fréquences principales relevées sont employées à cet effet.



**Figure 14-13 – Spectre du signal après filtrage anti-harmoniques du transitoire d'une tension (Evènement : enclenchement d'une batterie de condensateurs)**

Une telle démarche n'est pas applicable aux défauts monophasés, car la fréquence de leur composante transitoire principale est proche de la fréquence fondamentale. La durée du régime transitoire conditionnant la taille de la fenêtre utilisée pour l'observation des formes d'onde, la résolution de l'analyse spectrale est limitée. Elle ne permet pas de distinguer ces deux fréquences (Figure 14-14).

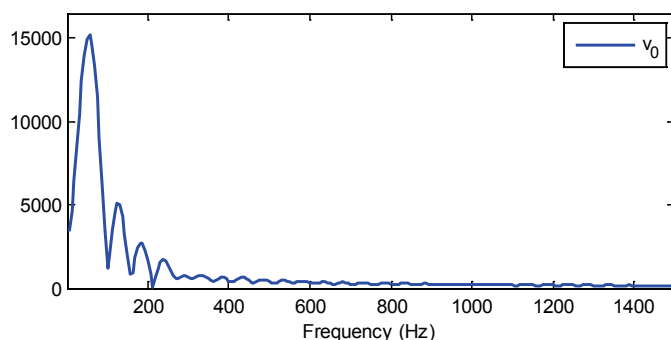
L'initialisation des composantes fréquentielles du modèle utilisé pour cette catégorie d'évènements repose sur l'analyse d'un grand nombre de perturbations réelles. On formule l'hypothèse que la fréquence principale  $f_{p_1}$  du spectre fourni par la FFT est la moyenne de la composante fondamentale  $f_0$  et de la composante principale du transitoire  $f_{o_1}$ . Cette dernière est initialisée à partir de la relation (14-15). Si cette approximation ne correspond pas nécessairement à la réalité, elle s'en approche suffisamment pour ne pas fausser le procédé d'estimation paramétrique.

$$f_{o_1} = 2f_{p_1} - f_0$$

**(14-15)**



Un problème similaire se pose pour les autres composantes sinusoïdales amorties. Celles-ci sont difficilement dissociables des composantes harmoniques du spectre. En raison du manque d'informations, on les fixe à des fréquences couramment observées dans ces transitoires, à savoir 300 Hz et 1 kHz [FER95].



**Figure 14-14 – Spectre de la tension homopolaire pendant le transitoire d'apparition d'un défaut monophasé**

### **Mise en œuvre de la méthode d'ajustement**

La méthode d'estimation des paramètres procède en plusieurs étapes (Figure 14-15).

#### ✓ **Sous-échantillonnage du signal**

Parallèlement à l'initialisation des paramètres du modèle, les signaux analysés par le procédé sont, dans un 1<sup>er</sup> temps, sous-échantillonnés. Les signaux mesurés à une fréquence  $f_e$  sont ré-échantillonnés à une fréquence inférieure  $f_{sé}$  telle que  $f_{sé} = f_e/2^k$  avec  $k \in \mathbb{N}$ . Ce sous-échantillonnage du signal limite le nombre de minima locaux de la fonction d'estimation et réduit le risque d'erreurs lors de l'estimation.

#### ✓ **Boucle d'estimation**

Les étapes précédentes réalisées, un processus itératif est utilisé pour ajuster les données. Après chaque évaluation, le nouveau vecteur de paramètres est réinjecté afin de servir de base pour l'évaluation suivante. Le processus d'estimation comporte deux boucles imbriquées :

##### ○ ***Boucle 1 : Rééchantillonnage du signal servant de base à l'estimation***

Les données analysées par le procédé d'ajustement sont rééchantillonnées. Cette augmentation de la fréquence d'échantillonnage ne repose pas sur un quelconque procédé d'interpolation. On récupère uniquement une partie des échantillons éliminés lors de l'étape de sous-échantillonnage. Le signal dit « rééchantillonné » est donc une version moins sous-échantillonnée du signal initial, c'est-à-dire  $f_{sé} \leq f_{ré} \leq f_e$ .

Cette étape améliore progressivement l'estimation des paramètres du modèle. Elle est répétée jusqu'à ce que l'estimation soit effectuée sur le signal initial, c'est-à-dire sur le signal non sous-échantillonné ( $f_{ré} = f_e$ ).

○ *Boucle 2 : Ajustement de l'espace d'observation et élévation de l'ordre du modèle*

Plusieurs actions sont réalisées en parallèle à mesure de l'élévation de la fréquence d'échantillonnage du signal analysé  $f_{ré}$ .

La taille de la fenêtre d'observation utilisée pour l'estimation est réduite avec l'élévation de la fréquence du signal. Cette réduction de l'intervalle d'étude améliore l'estimation des composantes fréquentielles du signal les plus élevées car elles sont localisées dans les premiers instants suivant l'apparition du transitoire.

L'ordre du modèle est également progressivement augmenté. Suivant la fréquence d'échantillonnage considérée, la partie sinusoïdale amortie du modèle (14-14) comporte de une à trois composantes oscillatoires. A chaque itération, une composante amortie supplémentaire est intégrée au modèle dans les limites imposées par la fréquence de rééchantillonnage  $f_{ré}$ .

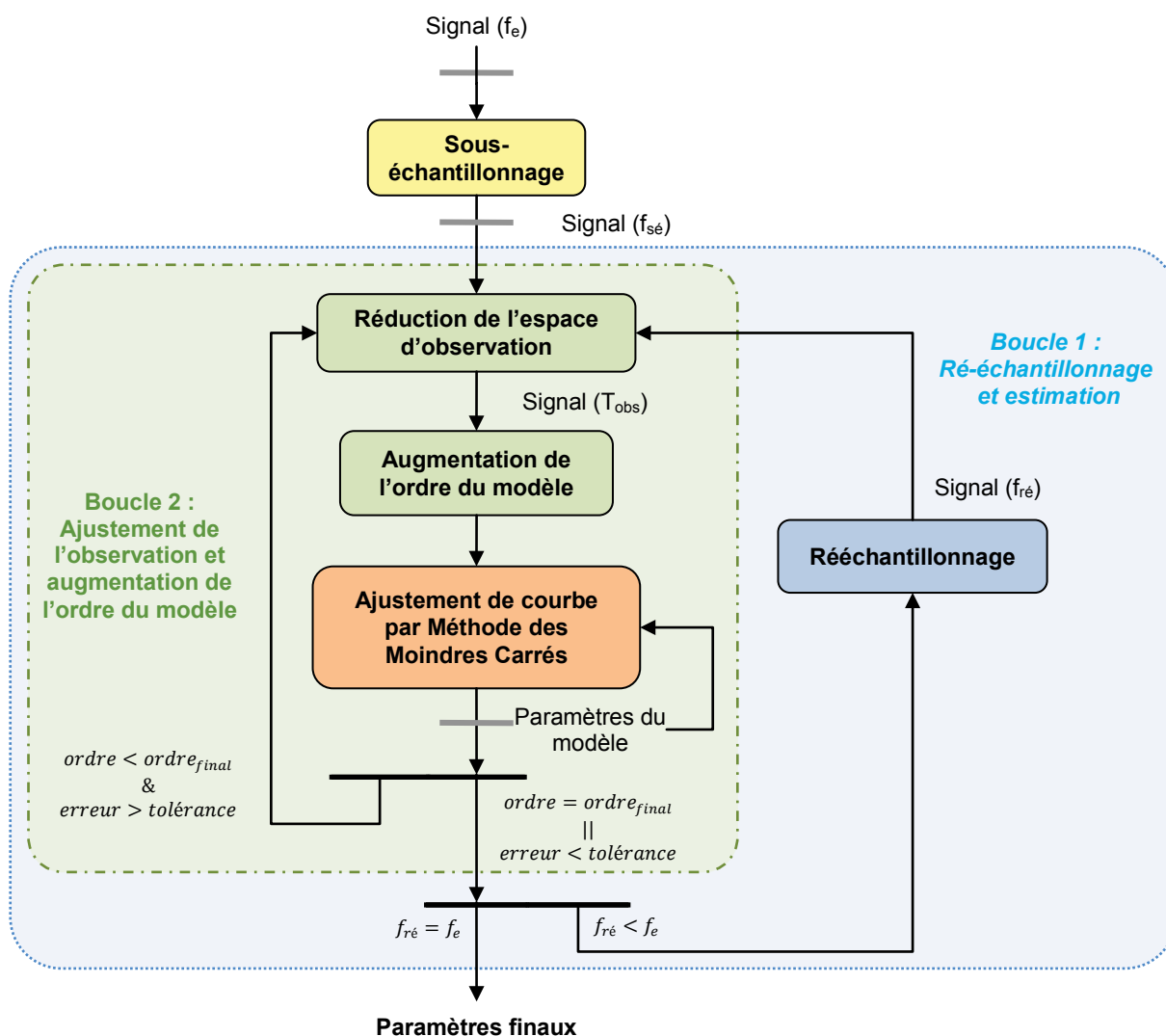


Figure 14-15 – Illustration du processus d'estimation

Avant chaque estimation, le jeu de paramètres obtenu lors de l'étape précédente est réinjecté. Il est complété soit par les valeurs des composantes fréquentielles principales identifiées lors de l'analyse spectrale par FFT, soit à partir des hypothèses formulées sur le signal.

Le processus d'estimation est interrompu lorsque deux conditions sont remplies :

- ✓ La boucle de rééchantillonnage est arrivée à son terme, c'est-à-dire que le signal initial est utilisé pour réaliser l'ajustement des données.
- ✓ La boucle d'ajustement de l'espace d'observation et d'incrémentation de l'ordre du modèle (boucle 2) s'est achevée.

Cette boucle interne s'arrête lorsque l'ordre maximal est atteint (3 composantes fréquentielles dans la partie oscillatoire du modèle (14-14)) ou lorsque l'erreur d'estimation est inférieure à une certaine tolérance.

L'ordre du modèle utilisé pour l'estimation du comportement transitoire des formes d'onde est ainsi adapté par le procédé d'estimation itératif développé.

## Chapitre 15 – Sensibilité aux erreurs de segmentation

Lors de la phase de caractérisation, différents types d'indicateurs décrivent les régimes de fonctionnement transitoires et permanents des formes d'onde. Ils sont choisis et mis en œuvre de manière à rendre les informations robustes aux perturbations de type harmoniques et bruit ainsi que, dans une certaine mesure, aux erreurs induites par la mesure ou le calcul. Cette robustesse suppose néanmoins que les intervalles temporels caractéristiques des perturbations, c'est-à-dire leurs instants d'apparition, d'évolution et de disparition, soient connus avec exactitude.

Lors de l'analyse automatique des formes d'onde mesurées sur les réseaux électriques, la précision de la décomposition des formes d'onde est assujettie à la méthode de segmentation utilisée (Chapitre 9). Même faible, l'erreur réalisée sur les instants significatifs des perturbations influence les valeurs des indicateurs. Plus cette erreur est importante, plus le risque d'une caractérisation erronée et donc d'une identification inexacte augmente.

Dans ce chapitre, plusieurs indicateurs présentés au cours des deux chapitres précédents sont étudiés. Leur analyse permet de quantifier le risque introduit par les erreurs de segmentation sur les informations fournies par les indicateurs de reconnaissance. Leur impact sur la caractérisation des perturbations causées par des défauts, enclenchements de batteries de condensateurs et réenclenchements de départs HTA est investigué.

L'étude des indicateurs de reconnaissance utilisés par le système a permis d'identifier les intervalles de validité requis pour chaque type de perturbations. Ces intervalles correspondent à la marge d'erreur autorisée pour le procédé de segmentation.

### 15.1. Impact sur la caractérisation des régimes permanents

Les indicateurs employés pour caractériser les régimes permanents des formes d'onde sont de deux types. Ils se basent soit sur le comportement moyen des grandeurs électrotechniques comme les valeurs efficaces, les composantes symétriques et les puissances, soit sur l'analyse spectrale à des fréquences spécifiques (recherche de TCFM à 175 Hz).

#### **Impact sur les indicateurs « moyennés »**

Tant que les erreurs de détection des transitoires sont raisonnables (inférieures à une demi-période), la caractérisation déterminée par calcul de la moyenne est peu impactée. Ceci s'explique par le fort effet passe-bas du calcul de la moyenne qui rend les indicateurs peu sensibles à des erreurs limitées.

- ✓ Les variations des indicateurs dues à la détection tardive du début du régime permanent sont très faibles car les fluctuations des données électrotechniques analysées sont limitées sur l'intervalle analysé. Un constat analogue est dressé si la fin du régime permanent intervient trop tôt.
- ✓ Si le début de régime permanent est détecté en avance, les erreurs sur la caractérisation de la perturbation sont plus importantes puisqu'un régime de fonctionnement différent est considéré dans le calcul de la moyenne. Cette erreur dépend de la durée globale du régime permanent, de celle du transitoire pris en compte et de la valeur de la grandeur sur les deux intervalles (15-1). Plus le régime permanent est court, plus la valeur moyenne de l'indicateur sur le régime transitoire joue un rôle prépondérant et plus l'erreur sur la valeur des indicateurs est importante. Un constat similaire est dressé si la fin de l'intervalle analysé inclut une partie du régime transitoire suivant.

$$\varepsilon = \frac{\frac{t}{p} - \frac{\sum_{k \in RT} x(k)}{\sum_{k \in RP} x(k)}}{1 + \frac{t}{p}} \approx \left(1 - \frac{\langle X \rangle_{RT}}{\langle X \rangle_{RP}}\right) \frac{t}{p} \quad (15-1)$$

Où :  $t$  est la durée du transitoire ( $RT$ ) considérée dans le calcul de la moyenne  
 $p$  est la durée du régime permanent ( $RP$ ) analysé

### **Impact sur les indicateurs d'« analyse spectrale »**

L'inclusion d'une partie d'un régime transitoire influence également les critères basés sur l'analyse du contenu spectral du segment permanent. L'intervalle transitoire considéré entraîne l'apparition de composantes fréquentielles supplémentaires dans le spectre du signal. Ces fréquences non significatives risquent de parasiter l'analyse du signal. Plus le segment permanent est court, plus leur effet parasite est important.

A l'inverse, l'utilisation d'un intervalle d'observation plus court que le régime permanent réel n'a qu'un effet limité. Elle réduit uniquement la résolution de l'estimation spectrale.

## **15.2. Impact sur la caractérisation des régimes transitoires**

Si l'impact des erreurs de segmentation est évident sur la caractérisation des régimes permanents, leurs conséquences sur celle des régimes transitoires sont plus variées. Contrairement aux régimes permanents, une grande partie des informations contenues dans les transitoires est localisée au début du régime de fonctionnement. Cette propriété accroît entre autres la sensibilité de la caractérisation des perturbations aux erreurs de segmentation.

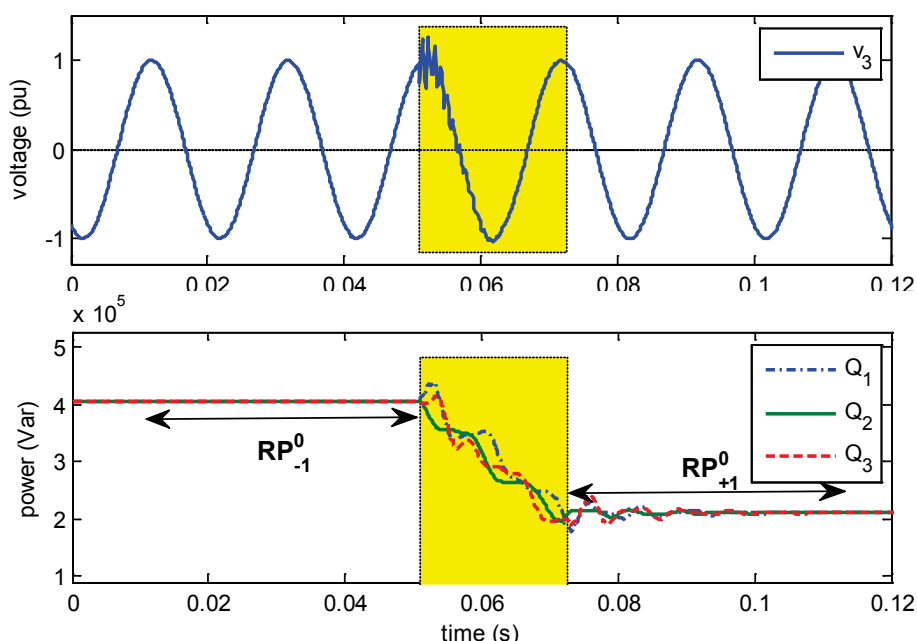
La sensibilité de ces indicateurs dépend de plusieurs éléments : le type de la perturbation recherché, ses caractéristiques, la mise en œuvre du traitement extrayant les caractéristiques du transitoire... Dans ce chapitre, cette variabilité est illustrée au travers de plusieurs indicateurs utilisés pour déterminer le type ou la direction des enclenchements de départs et de batteries de condensateurs.

### 15.2.1. Enclenchements de batteries de compensation

Le système de reconnaissance utilise plusieurs indicateurs pour caractériser les enclenchements de batteries de condensateurs. En raison de leur effet passe-bas, les grandeurs électrotechniques classiques ne sont pas capables de décrire le comportement de ces transitoires du fait de leur brièveté. Seuls les indicateurs analysant les variations observées entre les deux régimes permanents encadrant le transitoire présentent un réel intérêt pour ces événements (§14.2.2 et 14.2.3). Ils présentent une sensibilité différente de celle des indicateurs analysant le contenu du transitoire (§14.2.6 et 14.3.2). Plusieurs exemples de chaque type sont décrits dans ce mémoire.

#### 15.2.1.1. Analyse des variations entre régimes permanents successifs

On rappelle que le calcul des indicateurs analysant les variations locales repose sur des intervalles dont la durée est limitée à deux périodes (Figure 15-1). Ces intervalles temporels approximent le comportement de la grandeur sur les deux régimes permanents encadrants (§14.2.1.1). L'utilisation d'intervalles restreints améliore la précision des indicateurs. Mais elle les rend aussi plus sensibles aux erreurs de segmentation car l'effet passe-bas du calcul de la moyenne est moins fort.



**Figure 15-1 – Intervalles analysés pour le calcul des références de régimes permanents**

L'impact des erreurs de segmentation est similaire à celui observé, au paragraphe précédent, pour la caractérisation des régimes permanents.

- ✓ Si l'intervalle d'observation inclut une partie du régime transitoire, l'erreur sur la valeur de l'indicateur peut être approximée à l'aide de l'expression (15-1). Par exemple, en autorisant une erreur maximale de 10% sur la valeur du niveau de référence utilisée pour le calcul des indicateurs analysant les tensions simples et composées, le retard autorisé à la détection de l'instant d'apparition du transitoire est de 4 ms.

- ✓ Si l'intervalle d'observation n'analyse que le régime permanent, l'erreur réalisée sur le calcul de l'indicateur est négligeable. La stabilité des formes d'onde analysées pendant le régime permanent limite fortement les fluctuations de l'indicateur.

Pour ce type d'indicateurs, une détection trop précoce a donc peu d'incidence. Par contre, un retard de détection dégrade rapidement les informations.

Ces constatations permettent de définir le domaine de validité et, par la même occasion, les contraintes imposées à la segmentation. Un écart-type des erreurs de décompositions inférieur à 2 ms est imposé au procédé de segmentation. Celui développé dans ce manuscrit vérifie ces contraintes même lorsque les formes d'onde sont échantillonnées à des fréquences faibles (Chapitre 11).

### 15.2.1.2. Analyse du contenu du transitoire

Les indicateurs analysant le contenu des transitoires des enclenchements de batteries requièrent une précision de décomposition supérieure à celle des indicateurs précédents. On illustre cette propriété en étudiant la sensibilité de deux types d'indicateurs distincts.

#### Sensibilité de la recherche de direction

L'indicateur présenté au paragraphe 14.2.6 détermine la direction de la batterie responsable de la perturbation en analysant les formes d'onde au cours des tous premiers instants du transitoire. La Figure 15-2 présente le comportement de la valeur de cet indicateur pour des retards et des fréquences transitoires principales différents. Son analyse montre que la taille de l'intervalle de validité diminue avec la fréquence du transitoire  $f_{c1}$  (15-2) [CAU11a]. Cet intervalle est très restrictif puisqu'il n'autorise pas de retard supérieur à 0,125 ms en présence d'un enclenchement de batterie dont la fréquence principale est égale à 1 kHz. Si la puissance instantanée des signaux déterminés après filtrage anti-harmoniques des tensions et des courants était exploitée telle quelle, la précision requise pour une caractérisation fiable de la perturbation serait irréaliste sur des enregistrements réels.

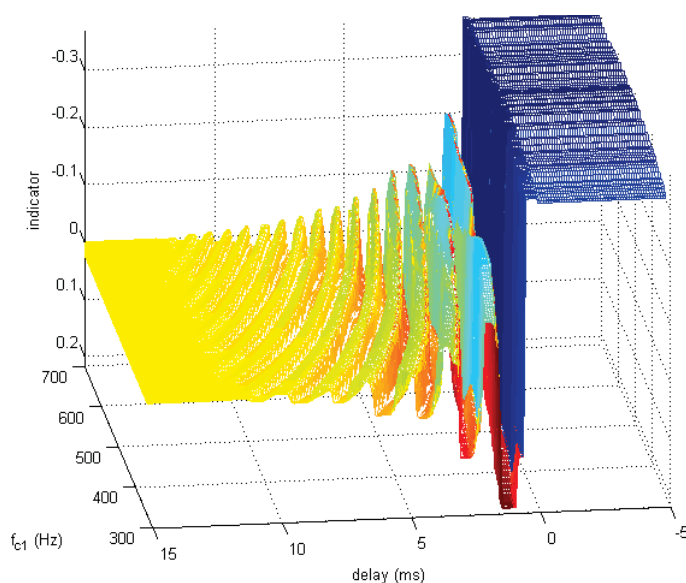
$$t_{\text{validity}} < t_{\text{sw}} + \frac{1}{8f_{c1}} \quad \text{Où : } t_{\text{sw}} \text{ est l'instant d'apparition réel du transitoire} \quad (15-2)$$

Mais, en adaptant la méthode d'analyse de cette grandeur, l'intervalle de validité de l'indicateur peut être rendu beaucoup moins contraignant. Pour ce faire, on profite de la zone de validité se trouvant avant l'instant d'apparition du transitoire ( $t < t_{\text{sw}}$ ) et on fait débiter la recherche du premier maximum un quart de période avant la détection de la perturbation ( $T_0/4$ ). La valeur de ce décalage fournit une marge de sécurité suffisante pour des détections en retard et en avance. L'indicateur ainsi mis en œuvre impose au procédé de segmentation la contrainte de précision suivante :

$$t_{\text{validity}} \leq t_{\text{sw}} + \frac{T_0}{4} \quad (15-3)$$

Cette implémentation a l'avantage d'augmenter le domaine de validité de l'indicateur vis-à-vis des erreurs de segmentation. Elle ne restreint pas non plus son champ d'applications en présence de perturbations proches puisque le pré-requis nécessaire à l'application du filtrage anti-harmoniques – à savoir un intervalle de deux périodes non perturbé avant l'apparition du transitoire d'enclenchement – n'est pas modifié. L'écart-type imposé par cet indicateur au procédé de segmentation et par sa mise en œuvre doit être inférieur à  $T_0/8$ .

L'étude de cet indicateur souligne l'importance de la mise en œuvre de l'extraction des transitoires. Si l'indicateur était utilisé sous sa forme initiale, une précision de segmentation supérieure à 0,06 ms serait requise.



**Figure 15-2 – Comportement de la valeur de l'indicateur de direction en fonction du retard de segmentation et de la fréquence principale du transitoire pour l'enclenchement d'une batterie en aval**

### Sensibilité de l'extraction des caractéristiques du transitoire

Les indicateurs déterminés par ajustement des formes d'onde (§14.3.1) ont un comportement différent en présence d'erreurs sur la décomposition des formes d'onde (Figure 15-3) **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

- ✓ Un retard de détection perturbe peu l'évaluation de la fréquence et de l'amortissement de la fréquence principale du transitoire. Seule son amplitude est sous-estimée. L'erreur réalisée sur cette dernière reste inférieure à 10% tant que le retard de détection n'excède pas 0,5 ms.
- ✓ Une détection trop précoce du transitoire détériore par contre fortement l'estimation.
- ✓ Au-delà d'un palier de 0,5 ms, l'erreur d'estimation de tous les paramètres du modèle dépasse 10% et augmente très fortement.

La plage de validité de ces indicateurs est globalement symétrique. Sa taille peut être approximée par la relation (15-4). Elle impose donc au procédé de segmentation un écart-type inférieur à 0,25 ms.

$$t_{sw} - 0,5 \text{ ms} < t_{\text{validity}} < t_{sw} + 0,5 \text{ ms}$$

**(15-4)**



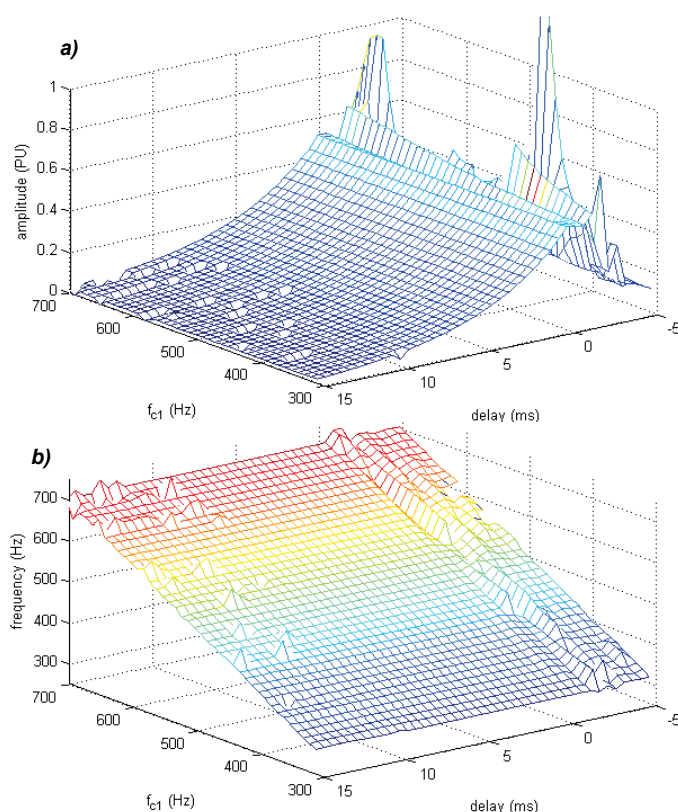
### 15.2.1.3. Contraintes de précision sur la décomposition

Au cours des deux paragraphes précédents, on a vu que les indicateurs utilisés pour caractériser les transitoires des enclenchements de batteries ont des plages de validités très différentes. Elles résultent à la fois des informations recherchées dans le transitoire et de la mise en œuvre de la méthode utilisée pour les extraire.

L'intersection de ces plages impose que l'écart-type des segmentations soit inférieur à 0,25 ms dans le cas général. Cette condition est vérifiée par le procédé développé pour des signaux échantillonnés à des fréquences supérieures à 5 kHz (Chapitre 11).

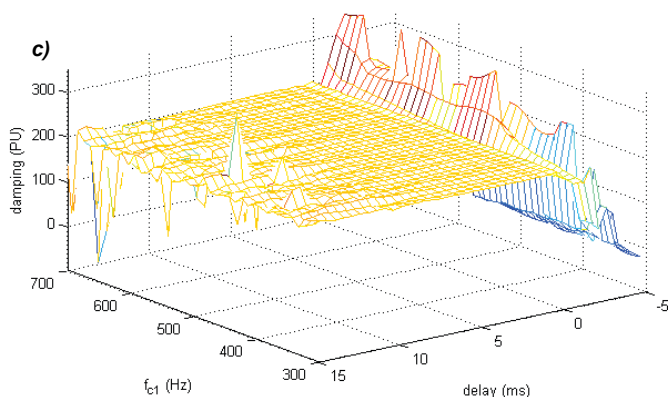
Par contre, pour des signaux de qualité inférieure, ces contraintes sur la précision ne peuvent être atteintes. Pour les fréquences d'échantillonnage de 1,6 à 3,2 kHz, l'emploi d'indicateurs analysant le contenu spectral des transitoires est impossible (§14.3.2). Le transitoire des formes d'onde n'est en effet pas suffisamment détaillé pour appliquer de telles méthodes. Dans ces conditions, seuls les indicateurs analysant les variations des régimes permanents sont exploités.

L'écart-type imposé à l'erreur de segmentation n'est alors plus que de 2°ms. La réduction des performances de la méthode de segmentation observées avec des fréquences d'échantillonnage plus faibles est sans conséquence sur la caractérisation puisque cette précision est facilement atteinte par le procédé de segmentation développé quel que soit le type de perturbations détecté. On notera cependant que pour des telles fréquences, l'information de direction sur la batterie responsable de la perturbation ne peut être déterminée.



**Figure 15-3 – Comportement des indicateurs d'ajustement d'une forme d'onde de tension lors de l'enclenchement d'une batterie de condensateurs localisée en aval du point de mesure**

- a) Amplitude de la composante principale
- b) Fréquence de la composante
- c) Amortissement de la composante

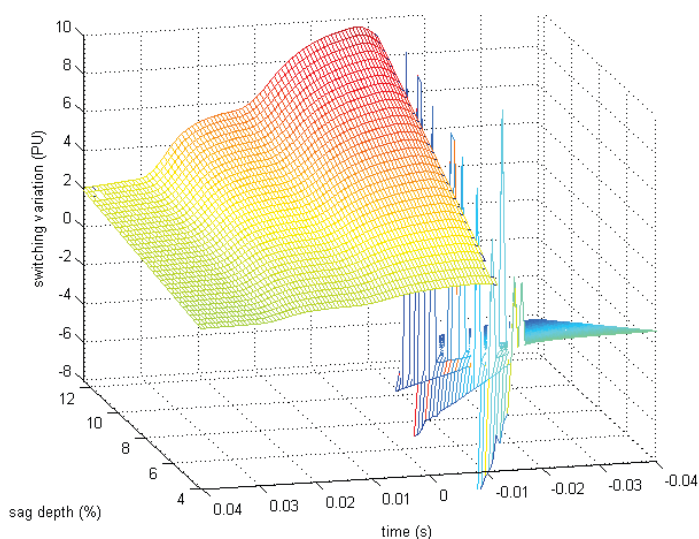


### 15.2.2. Réenclenchements de départs

Des contraintes de précision similaires peuvent être mises en évidence pour les indicateurs dédiés aux enclenchements de transformateurs.

Les indicateurs analysant les variations locales des grandeurs électrotechniques autour et pendant les transitoires ont une plage de validité similaire à celle des indicateurs présentés au paragraphe 15.2.1.1. Ils imposent donc une précision de décomposition inférieure à 2 ms.

Les indicateurs déterminés à partir des paramètres d'un modèle exponentiel sont fortement affectés par une détection des transitoires en avance (Figure 15-4). La décroissance des performances de la caractérisation est moins importante lorsque la perturbation est détectée avec retard. Pour ces indicateurs, l'écart-type de la segmentation des transitoires doit être inférieur à 2,5 ms [CAU11a].



**Figure 15-4 – Comportement d'un indicateur analysant l'appel de courant à l'enclenchement d'un départ en aval du point de mesure en fonction de l'erreur de segmentation et de la profondeur du creux**



## Partie 4

### Système de reconnaissance

#### Sommaire :

<b>CHAPITRE 16 – RECONNAISSANCE DES PERTURBATIONS .....</b>	<b>165</b>
<b>CHAPITRE 17 – ARCHITECTURE DU SYSTEME DE RECONNAISSANCE.....</b>	<b>167</b>
17.1. UNE STRUCTURE EN DEUX PARTIES.....	167
17.2. CLASSES D'EVENEMENTS RECHERCHES .....	168
17.3. RECONNAISSANCE DES EVENEMENTS PERMANENTS .....	170
17.4. RECONNAISSANCE DES EVENEMENTS TRANSITOIRES .....	171
17.5. SYSTEMES DE DECISION .....	175
17.5.1. <i>Système de décision expert</i> .....	175
17.5.2. <i>Système de décision à apprentissage supervisé</i> .....	178
<b>CHAPITRE 18 – CONSTITUTION DES BASES DE CONNAISSANCES .....</b>	<b>181</b>
18.1. OBJECTIFS .....	181
18.2. CONFIGURATIONS DES RESEAUX D'ETUDE .....	182
18.3. DEMARCHE DES SIMULATIONS PARAMETRIQUES .....	184
18.4. OPTIMISATION DE LA STRATEGIE DE SIMULATIONS.....	186
18.4.1. <i>Contexte d'utilisation</i> .....	186
18.4.2. <i>Commande des simulations</i> .....	188
<b>CHAPITRE 19 – MISE AU POINT DES SYSTEMES DE DECISION .....</b>	<b>191</b>
19.1. CALIBRAGE DES CRITERES DES SYSTEMES EXPERTS.....	191
19.1.1. <i>Objectifs de l'optimisation des systèmes expert</i> .....	192
19.1.2. <i>Définition des critères de reconnaissance</i> .....	195
19.1.3. <i>Définition de la structure de reconnaissance</i> .....	197
19.1.4. <i>Impact des cas d'utilisation</i> .....	199
19.1.5. <i>Evaluation et analyse des performances</i> .....	200
19.2. RECHERCHE DES CLASSIFIEURS SVM OPTIMAUX.....	202
19.2.1. <i>Traitement de la base de données</i> .....	202
19.2.2. <i>Optimisation des performances du classifieur SVM</i> .....	203
19.2.3. <i>Impact des cas d'utilisation</i> .....	206
19.2.4. <i>Evaluation et analyse des performances</i> .....	207

<b>CHAPITRE 20 – PERFORMANCES DU SYSTEME DE RECONNAISSANCE .....</b>	<b>210</b>
20.1. BASE DE DONNEES D'ENREGISTREMENTS REELS .....	210
20.2. ARCHITECTURE REPOSANT SUR LES SYSTEMES EXPERTS .....	212
20.2.1. <i>Evaluation des performances du système expert</i> .....	212
20.2.2. <i>Analyse des performances</i> .....	213
20.3. ARCHITECTURE REPOSANT SUR LES CLASSIFIEURS SVM .....	214
20.3.1. <i>Evaluation des performances des classifieurs SVM</i> .....	214
20.3.2. <i>Analyse des performances</i> .....	215
20.4. COMPARAISON DES DEUX SYSTEMES DE CLASSIFICATION.....	217

## Chapitre 16 – Reconnaissance des perturbations

L'étape d'identification des perturbations est la dernière du système de reconnaissance automatique développé. Elle s'appuie sur les résultats des deux étapes précédentes pour déterminer de manière fiable la classe de l'évènement perturbateur détecté. Elle utilise la décomposition des régimes de fonctionnement des perturbations fournie par l'étape de segmentation et l'analyse différenciée des régimes transitoires et permanents des formes d'onde réalisée par l'étape de caractérisation.

Les classes d'évènements qu'elle recherche sont définies par plusieurs éléments :

- ✓ le type de l'évènement (défaut, enclenchement de départ...),
- ✓ la direction relative de la source de la perturbation (en amont ou en aval du point de mesure),
- ✓ la ou les phases éventuellement impactées.

Des classes différentes sont également définies en fonction de la position du point d'observation sur le réseau, car ce facteur influence fortement les signatures des perturbations. Si trois positions distinctes peuvent être considérées (jeu de barres du poste source, primaire d'un poste HTA/BT et milieu d'un départ HTA), le cas des points de mesure en milieu de réseau n'a pas été envisagé dans le cadre de cette thèse. Les méthodes proposées dans ce manuscrit peuvent toutefois être facilement adaptées à cette situation.

Plusieurs types de systèmes de décision sont utilisés dans la littérature afin de discriminer les différentes classes d'évènements électrotechniques observées sur les réseaux de distribution HTA. Les systèmes experts [BO703, DAS00, KEZ93], les réseaux de neurones [REA07, SAN00a] et les machines à vecteurs de support (SVM) [EKI09, LIN08] sont les plus couramment employés.

Dans ce manuscrit, deux familles de systèmes de classification sont testées et comparées : les systèmes experts et les classifieurs SVM. Si leur champ d'applications est similaire, ces systèmes disposent d'avantages qui leur sont propres (réduction du coût de l'identification, mise-à-jour du système aisée...).

- ✓ Le système expert est choisi pour la lisibilité de sa structure de décision. Il est facilement mis en œuvre grâce à la grande capacité de discrimination des indicateurs utilisés. Sa structure permet également d'optimiser le coût de la reconnaissance en calculant les indicateurs au fur et à mesure de leur analyse lors du parcours de l'arbre décisionnel.
- ✓ La structure de décision à apprentissage supervisé basée sur des méthodes SVM est préférée aux réseaux de neurones pour sa capacité de généralisation et son faible risque de sur-apprentissage [JAI00, VAP98]. Une fois les indicateurs de reconnaissance déterminés, elle

permet également une prise de décision rapide. Les opérations de discrimination sur lesquelles elle repose sont peu nombreuses et de complexité limitée.

Ces deux systèmes poursuivent des objectifs précis destinés à assurer la fiabilité de leurs résultats. On exprime ces objectifs à l'aide de trois grandeurs que l'on cherche à minimiser :

- ✓ le *taux d'erreurs de classification* signale les événements pour lesquels leur classe de perturbations est mal identifiée. Il reflète la capacité du procédé à déterminer la classe exacte de l'évènement détecté.
- ✓ le *taux de fausses identifications* correspond aux événements identifiés par le système sans que des perturbations significatives affectent les formes d'onde mesurée.
- ✓ le *taux de non-identifications* indique le pourcentage d'évènements électrotechniques détectés qui sont identifiés de manière erronée comme un fonctionnement normal du réseau. Cette grandeur témoigne du comportement du système en présence de fausses segmentations.

L'étape de reconnaissance devant s'effectuer en quasi-temps-réel, une attention particulière est apportée au coût calculatoire des méthodes de classification utilisée.

Pour répondre à ces objectifs et assurer une identification robuste, différents phénomènes sont envisagés par les systèmes de reconnaissance. Par exemple, la présence de fausses segmentations (segmentations sans perturbation significative des formes d'onde) est considérée afin d'éviter une évaluation pessimiste de la qualité de la fourniture d'électricité.

On tient également compte des incertitudes sur les indicateurs de reconnaissance caractérisant les régimes de fonctionnement transitoires et permanents. Ces incertitudes dépendent fortement des méthodes utilisées pour déterminer les grandeurs caractérisantes des perturbations. Elles sont entre autres liées à la sensibilité des traitements appliqués aux formes d'onde :

- ✓ aux perturbations permanentes de type harmoniques et bruit,
- ✓ aux erreurs de mesure telles que le calibrage de l'offset des voies de mesure et
- ✓ aux évaluations insuffisamment précises des instants d'apparition des régimes de fonctionnement transitoires.

Dans l'ensemble de cette partie, les principes, les objectifs, la mise en œuvre et les performances des deux systèmes de reconnaissance sont présentés. La démarche suivie pour constituer la base d'évènements simulés qui a été utilisée pour leur apprentissage y est également détaillée.

## Chapitre 17 – Architecture du système de reconnaissance

### 17.1. Une structure en deux parties

Lors de l'étape de caractérisation présentée en Partie 3, les formes d'onde sont exploitées de manière différente selon que le régime est permanent ou transitoire. On rappelle que la nature des perturbations, l'adaptation des méthodes d'analyse à leur dynamique et la volonté de simplifier le système poussent à une telle distinction (§12.2). Les deux régimes de fonctionnement des perturbations sont donc caractérisés par des jeux d'indicateurs distincts.

La structure de l'étape de reconnaissance est conditionnée par cette analyse différenciée des régimes de fonctionnement. Elle exploite cette particularité pour définir le processus d'identification des perturbations du panel d'évènements recherchés :

- ✓ Les jeux d'indicateurs décrivant les régimes permanents sont utilisés pour reconnaître les défauts, les raccordements et déclenchements de charges et les signaux tarifaires (TCFM).
- ✓ Les indicateurs analysant les régimes transitoires sont dédiés à l'identification des enclenchements de départs, des connexions de batteries de condensateurs et des transitoires des défauts monophasés survenant sur les réseaux compensés.

Ces deux jeux d'indicateurs sont analysés indépendamment par un ou plusieurs systèmes de décision afin de déterminer la vraisemblance de chaque classe de perturbations (Figure 17-1).

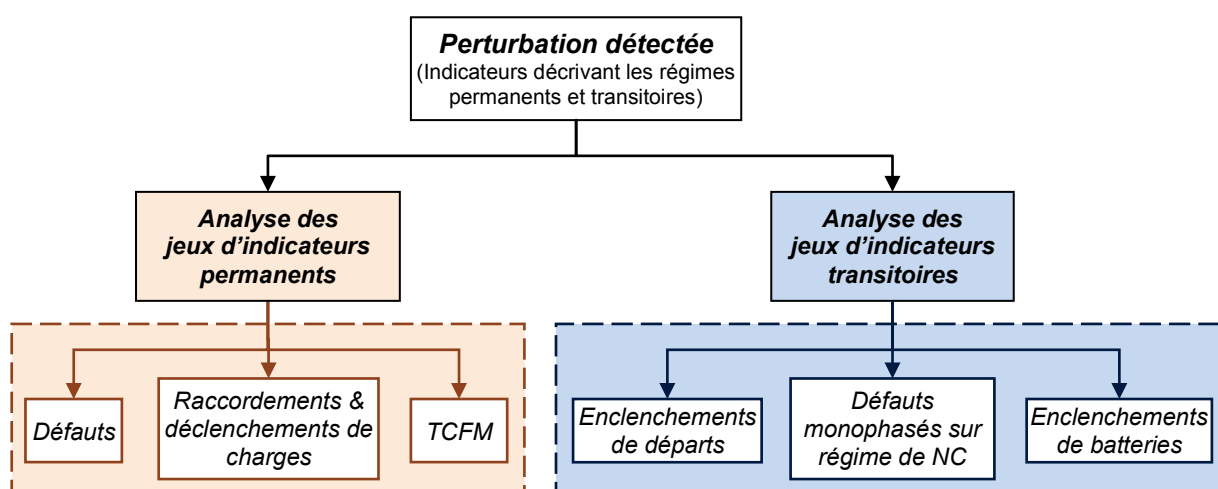


Figure 17-1 – Structure générique du module d'identification des perturbations

La structure présentée à la Figure 17-1 analyse progressivement les régimes de fonctionnement successifs des formes d'onde des perturbations. Chaque segment est caractérisé et identifié à



mesure de la décomposition des formes d'onde. Cette analyse progressive des régimes de fonctionnement est nécessaire à leur caractérisation. On rappelle en effet que le calcul de certains indicateurs requiert la connaissance du dernier régime permanent sans défaut (§13.3). Une caractérisation avec relation de dépendance est ainsi réalisée, c'est-à-dire que la caractérisation du  $i^{\text{me}}$  régime de fonctionnement dépend du résultat de l'identification des régimes précédents.

Sous réserve d'utiliser des critères de décision appropriés, cette structure de reconnaissance permet également d'identifier des perturbations provoquées par des événements superposés tels que le réenclenchement d'un départ sur défaut.

### 17.2. Classes d'évènements recherchés

Le système de reconnaissance développé recherche deux sortes d'informations dans les formes d'onde des perturbations : le type de l'évènement électrotechnique responsable de la perturbation et la position de son origine par rapport au point d'observation du réseau. Les événements considérés sont multiples. Ils regroupent les défauts, les raccordements et déclenchements de charges, les signaux tarifaires (TCFM) ainsi que les enclenchements de départs et de batteries de condensateurs de compensation.

Le système développé détermine le type et la direction de tels événements lorsque les points de mesure sont situés soit au niveau du jeu de barres d'un poste source, soit au primaire d'un poste de livraison client HTA/BT. On rappelle que l'analyse des points de mesure en milieu de départ n'a pas été envisagée dans le cadre de cette thèse mais que les méthodes proposées sont facilement adaptables à cette situation.

La diversité des situations envisagées nécessite la définition d'un grand nombre de classes de perturbations. La position de l'évènement sur le réseau et sa direction par rapport au point de mesure impactent fortement les signatures des perturbations observées. Pour un grand nombre d'évènements perturbateurs, ces deux paramètres imposent la définition de quatre classes distinctes. Par exemple, pour les défauts biphasés observés à partir du poste source, on distinguera ceux survenant en aval du jeu de barres de ceux survenant en amont. Dans le cas où le qualimètre est installé au primaire d'un poste HTA/BT, on distinguera également, pour cette catégorie de défauts, ceux apparaissant en aval du poste appareillé de ceux localisés en amont. Cette distinction n'est pas réalisée pour un seul type d'évènements : l'injection de signaux tarifaires (TCFM).

Pour certains défauts, une subdivision supplémentaire apparaît. Contrairement aux perturbations causées par les enclenchements de départs ou de batteries de condensateurs de compensation, leur analyse nécessite la prise en compte de la ou des phases en défaut. Trois classes d'évènements par type de défauts doivent ainsi être considérées pour les défauts monophasés et biphasés.

L'ensemble des classes envisagées par le système de reconnaissance est reporté dans le Tableau 4. Les événements pour lesquels la position du point de mesure et la direction relative de la perturbation doivent être prises en compte sont signalés par le sigle (×2) dans les colonnes 2 et 3 du tableau. La colonne 4 indique pour quels types d'événements une information sur la ou les phases en défaut doit être considérée. Ils sont signalés par le sigle (×3).

Les 69 classes de perturbations envisagées par le système de reconnaissance ne sont toutefois pas considérées de manière simultanée (Tableau 4). Si le système d'acquisition mesure les formes d'onde au primaire d'un poste HTA/BT, les classes associées à l'observation des perturbations au jeu de barres d'un poste source n'ont pas à être prises en compte. De même, comme le régime de neutre du réseau HTA est soit compensé, soit impédant, seule la classe de défauts monophasés correspondante est conservée. Ainsi, quelle que soit la position du point de mesure sur le réseau, le système considère simultanément un maximum de 29 classes de perturbations.

Type d'événements		Point de mesure J.d.b. / Poste Client	Direction Amont / Aval	Informations sur les phases en défaut	Classes vues par l'analyse des RP	Classes vues par l'analyse des RT
Défauts	Monophasés sur :					
	• neutre compensé	×2	×2	×3	✓	✓
	• neutre impédant	×2	×2	×3	✓	×
	Biphasés à la terre	×2	×2	×3	✓	×
	Biphasés-isolés	×2	×2	×3	✓	×
	Triphasés	×2	×2	Ø	✓	×
Enclenchements de départs		×2	×2	Ø	×	✓
Enclenchements de batteries		×2	×2	Ø	×	✓
Raccordements de charges		×2	×2	Ø	✓	×
Déconnexions de charges		×2	×2	Ø	✓	×
TCFM		Ø	Ø	Ø	✓	×

**Tableau 4 – Présentation des 69 classes considérées par le système de reconnaissance**

Les colonnes 2 à 4 du Tableau 4 représentent l'ensemble des classes considérées par le système  
Les 5<sup>e</sup> et 6<sup>e</sup> colonnes indiquent la manière selon laquelle une classe est considérée lors de l'analyse des régimes de fonctionnement (✓ : classe conservée, × : classe « événements non considérés »)

L'analyse différenciée des régimes de fonctionnement du réseau autorise un raffinement supplémentaire du problème d'identification des perturbations. De par leur conception, les indicateurs obtenus suite à l'extraction des caractéristiques des perturbations ne permettent de discriminer que certains types de perturbations. Ceux analysant les régimes permanents sont dédiés aux défauts, aux raccordements de charges et à l'injection des signaux tarifaires tandis que ceux traitant les régimes transitoires caractérisent les enclenchements de départ, les connexions de batteries de condensateurs ainsi que les transitoires des défauts monophasés si le réseau est compensé. Un nombre plus restreint de classes de perturbations est ainsi considéré pour chaque type de régime de fonctionnement.

En présence de perturbations pour lesquelles ils ne sont pas conçus, les indicateurs risquent de fournir des informations insuffisamment discriminantes pour les différencier. Pour y remédier, on définit une classe générique regroupant toutes les classes de perturbations non considérées lors de l'analyse du régime de fonctionnement étudié. Cette « superclasse » est désignée dans ce manuscrit par le terme de « *classe d'évènements non considérés* ». Deux classes de ce type sont définies dans le système de reconnaissance, une par catégorie de régimes de fonctionnement. Elles simplifient fortement le système de décision et réduisent son taux de fausses alarmes.

Les classes d'évènements faisant partie de chaque « superclasse » sont explicitées dans les colonnes 5 et 6 du Tableau 4. L'ensemble des classes d'une colonne signalées par le sigle ✕ appartiennent à la classe d'évènements non considérés pour le régime de fonctionnement étudié. Les autres, indiqués par le sigle ✓, interviennent normalement dans le système de reconnaissance.

En tenant compte de ces simplifications, le nombre de classes considérées par le système *pour chaque point de mesure et régime de neutre* peut être réduit :

- ✓ En régime permanent, (25+1) classes de perturbations sont distinguées.
- ✓ En régime transitoire, (4+1) ou (6+1) classes de perturbations sont discriminées selon le régime de neutre du réseau.

### 17.3. Reconnaissance des évènements permanents

Le jeu d'indicateurs analysant les régimes permanents des formes d'onde est utilisé pour identifier les perturbations causées par les défauts, les raccordements de charges... Son coût calculatoire est faible (Chapitre 13) et les informations qu'il contient sont suffisamment discriminantes.

Ces indicateurs sont utilisés pour déterminer : le type de la perturbation (défaut monophasé, biphasé-isolé...), son évolution (variations de la résistance de défaut) et sa direction (origine de la perturbation en amont ou en aval du point de mesure).

Les indicateurs sont calculés différemment selon le type de systèmes de décision utilisé :

- ✓ Pour le système de décision expert, les indicateurs sont déterminés au fil de l'arbre de décision. L'emploi d'une telle méthode réduit le coût de la reconnaissance et laisse ses performances inchangées puisque seules les informations utiles à la prise de décision sont déterminées.
- ✓ Pour les systèmes de classification à apprentissage supervisé comme les SVM, l'ensemble des indicateurs de la base de représentation des perturbations qui décrivent un même régime de fonctionnement sont déterminés en une fois. Ils sont ensuite exploités simultanément par le système de décision. Ce calcul préalable tient à la structure même de la méthode de classification.

## 17.4. Reconnaissance des événements transitoires

Les indicateurs caractérisant les régimes transitoires des formes d'onde des perturbations ont un coût calculatoire variable. Pour certains, il est similaire à ceux analysant les régimes permanents (§14.2) tandis que, pour d'autres, des méthodes plus complexes et coûteuses sont utilisées (§14.3). Si la totalité des indicateurs de ce dernier type devait être calculée chaque fois qu'un transitoire était identifié, l'analyse des transitoires serait difficilement réalisable dans le cadre d'un système dont l'objectif est d'analyser les perturbations en quasi-temps-réel. Le temps de calcul requis pour déterminer chaque indicateur de raffinement est en effet au moins 10 fois supérieur à celui requis pour les autres indicateurs. Cette démarche est confortée par le fait que la grande majorité des transitoires est causée par des perturbations pouvant être analysées à partir de leurs régimes permanents. On utilise ainsi des méthodes plus complexes uniquement lorsque le panel des perturbations se restreint.

Afin d'assurer la classification rapide et efficace des perturbations transitoires, le système de reconnaissance associé est scindé en deux niveaux (Figure 17-2). Le premier utilise les indicateurs exploitant les variations locales observées pendant et autour des régimes transitoires des perturbations. Au cours du second, seuls les indicateurs susceptibles d'affiner la reconnaissance fournie par le niveau précédent sont calculés et analysés. Ces indicateurs caractérisent précisément le comportement transitoire des formes d'onde ou de certaines grandeurs électrotechniques.

Les indicateurs utilisés par le 1<sup>er</sup> niveau de reconnaissance des régimes transitoires sont désignés dans ce mémoire par le terme d'« indicateurs d'orientation ». Ceux analysés par le 2<sup>nd</sup> niveau sont désignés par le terme d'« indicateurs de raffinement ».

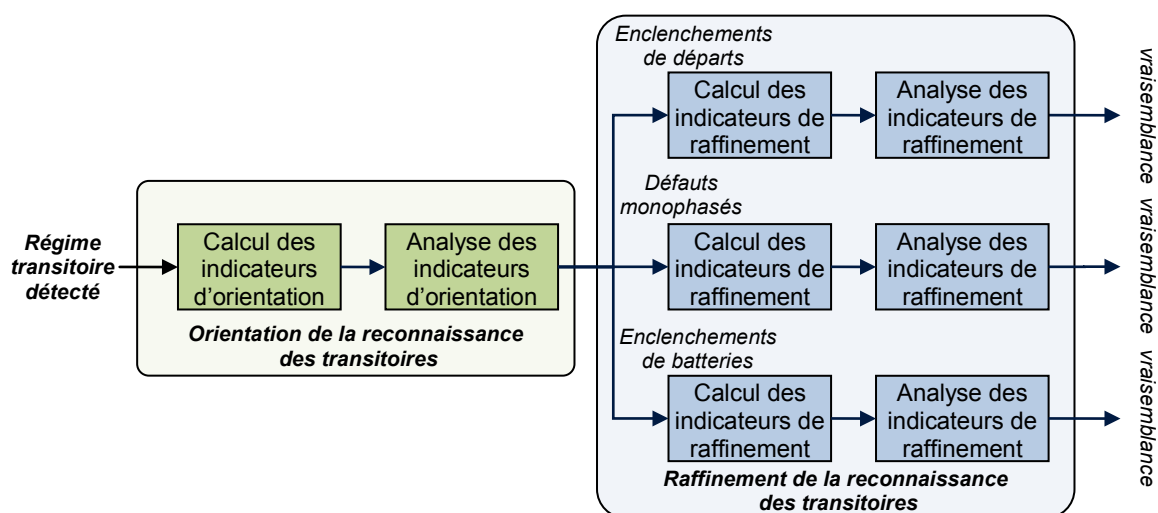


Figure 17-2 – Structure des modules de caractérisation et d'identification des régimes de fonctionnement transitoires

### Orientation de la reconnaissance

Lors de la première étape, les indicateurs exploitant les variations locales observées pendant et autour des régimes transitoires des perturbations sont analysés. Le niveau de contraintes qu'ils

imposent au système de reconnaissance est faible, même s'ils sont calculés à chaque régime transitoire. Du fait de leur complexité calculatoire limitée, ils sont adaptés à l'analyse en quasi-temps-réel des perturbations observées sur les réseaux de distribution.

Ces indicateurs d'orientation renseignent sur les propriétés des différents événements considérés dans le panel. En les traitant en premier, le système de décision les utilise comme un premier filtre d'identification qui contribue à orienter la recherche du type de perturbations vers l'origine du transitoire analysé. Ces indicateurs apportent des renseignements importants sur l'évolution générale du comportement des formes d'onde au cours de ce régime de fonctionnement. Dans certains cas, ils ne sont pas assez discriminants, car la caractérisation qu'ils proposent est limitée à certaines tendances des transitoires.

### **Raffinement de la reconnaissance**

La deuxième étape d'identification des régimes transitoires s'appuie sur la caractérisation fournie par le niveau précédent. L'orientation obtenue indique quels indicateurs doivent être calculés : seuls ceux dédiés aux types des perturbations identifiés comme vraisemblables sont déterminés. Cette exclusion est rendue possible par les dynamiques très différentes des trois phénomènes transitoires recherchés. Les indicateurs de raffinement étant basés sur les paramètres de modèles comportementaux exponentiels ou sinusoïdaux amortis, on procède à leur identification uniquement si l'événement à l'origine du transitoire possède vraisemblablement un comportement similaire. Il est par exemple inutile de rechercher un comportement sinusoïdal amorti dans les formes d'onde si la première étape oriente la reconnaissance uniquement vers les enclenchements de départs.

Une fois les valeurs de ces indicateurs déterminées, elles sont analysées par un second système de décision. Elles permettent de valider, d'affiner ou d'infirmer l'orientation fournie par la première étape. Comme elles caractérisent précisément la perturbation, leur pouvoir discriminant est plus important que celui des indicateurs précédents mais leur mise en œuvre s'avère plus complexe et coûteuse.

### **Une reconnaissance sur deux niveaux : un impact sur les performances ?**

L'analyse successive des indicateurs d'orientation et de raffinement permet de réduire fortement le coût global de l'identification des perturbations transitoires. De plus, cette séparation a l'avantage d'affecter peu ou pas la fiabilité de la reconnaissance.

Pour le système de décision expert, la décomposition de l'architecture de reconnaissance des régimes transitoires ne modifie pas ses performances. Les indicateurs qui ne sont pas calculés et analysés par le second niveau de reconnaissance sont dédiés à des événements déjà éliminés par le système de reconnaissance en raison de leur vraisemblance trop faible.

Pour le système de décision à apprentissage supervisé, les performances de reconnaissance de l'architecture à deux niveaux sont sensiblement identiques à celles d'une analyse à un seul niveau. L'amélioration des performances permise par l'analyse simultanée des indicateurs d'orientation et de

raffinement est faible (inférieure à 0,15%). La fiabilité de l'orientation déterminée à partir des seuls indicateurs d'orientation est plus faible, car l'inclusion des indicateurs de raffinement fortement discriminants a un effet bénéfique. On notera que le taux de reconnaissance déterminé à partir de l'analyse des seuls indicateurs d'orientation est, déjà à lui seul, très satisfaisant (§19.2).

### **Réalisation d'une nouvelle phase de segmentation**

Dans la Partie 2, on a vu que le procédé de segmentation adaptatif à « large spectre » utilisé par défaut est insuffisant pour distinguer les phases d'apparition et d'extinction de certains défauts monophasés survenant sur les réseaux à neutre compensé, c'est-à-dire les défauts auto-extincteurs et réamorçants. Pour pallier ce problème, un processus de segmentation « événementielle » est utilisé de manière complémentaire (cf. Chapitre 10).

Ce processus n'est activé qu'après l'analyse des indicateurs d'orientation : si la vraisemblance d'un défaut monophasé est suffisante, la décomposition initiale des formes d'onde des perturbations est raffinée. Le réseau sur lequel la mesure est effectuée doit également être mis à la terre par une bobine de compensation pour que l'étape de segmentation événementielle soit réalisée. Une fois la nouvelle décomposition déterminée, les indicateurs d'orientation sont à nouveau calculés et analysés pour chacun des segments identifiés. Ceux de raffinement sont traités pour la première fois lors de cette seconde phase de reconnaissance.

### **Calcul des indicateurs**

Comme pour l'analyse des régimes permanents, les jeux d'indicateurs d'orientation sont calculés différemment selon le type de systèmes de décision employé. Pour le système de décision expert, ils sont déterminés au fur et à mesure du parcours de son arborescence décisionnelle. Cela permet d'accroître leur vitesse de reconnaissance sans que leur fiabilité ne soit affectée. Pour le classifieur SVM, ils sont calculés en une seule fois au début du niveau de reconnaissance.

La Figure 17-3 présente l'architecture complète du système de reconnaissance des régimes permanents et transitoires des perturbations. On rappelle que cette analyse est réalisée progressivement, au fur et à mesure de la décomposition des régimes de fonctionnement des perturbations. On calcule et traite ainsi sans difficultés des indicateurs de reconnaissance dont les valeurs dépendent des résultats de l'identification des segments précédents.

Cette architecture analyse, lors de la 1<sup>re</sup> phase, des segments permanents et transitoires successifs. Au cours de la 2<sup>de</sup> phase, elle peut être amenée à analyser des suites de régimes transitoires déterminées par la segmentation événementielle.

À la suite de l'analyse différenciée des perturbations, aucune opération de synthèse n'est réalisée. Comme le système de reconnaissance repose sur l'analyse indépendante des régimes de fonctionnement, l'identification des perturbations ne requiert pas la mise en commun des informations déterminées pour les régimes transitoires et permanents successifs.

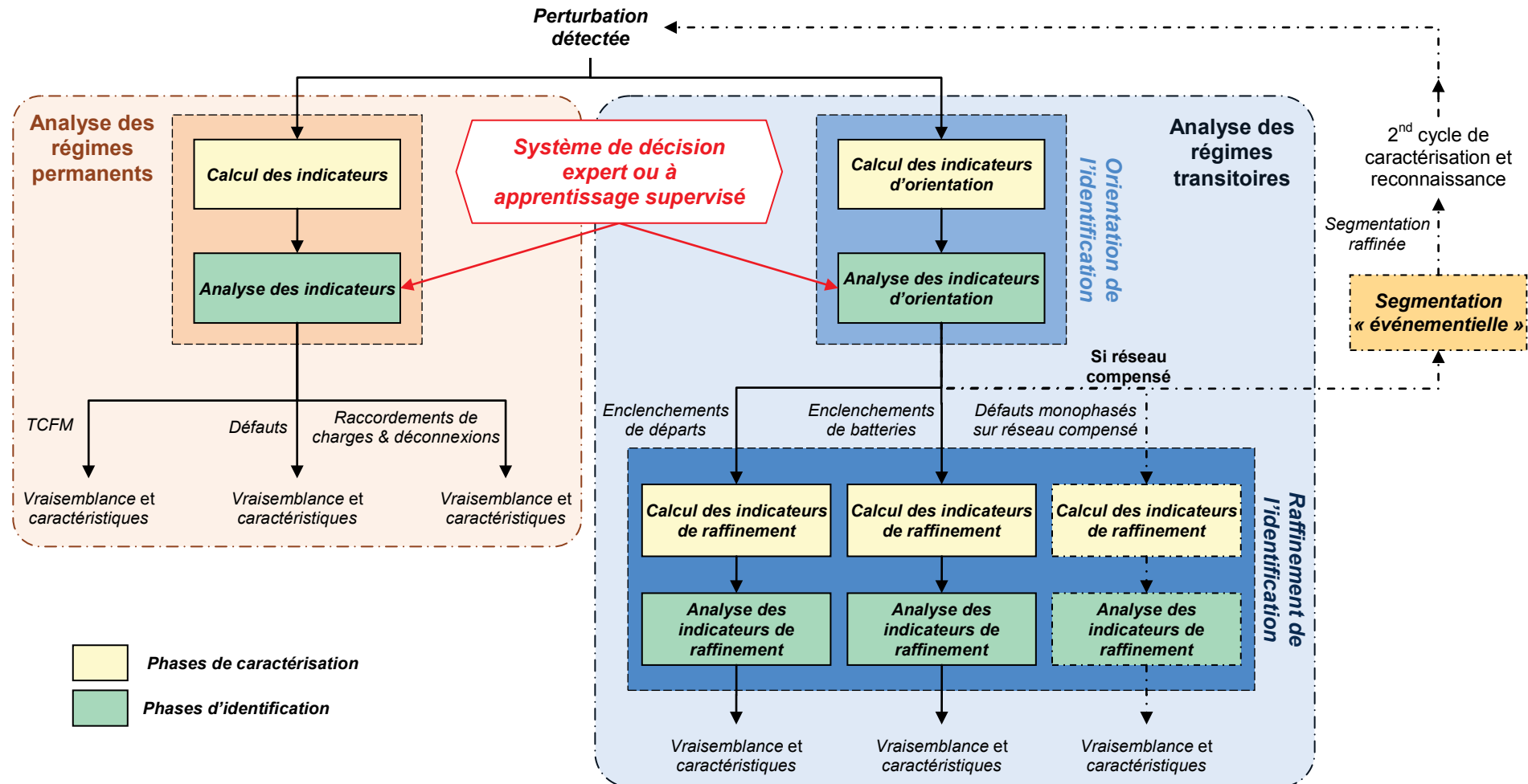


Figure 17-3 – Organisation des modules de caractérisation et de reconnaissance des régimes permanents et transitoires

## 17.5. Systèmes de décision

Deux familles de systèmes de décision sont testées et comparées dans ce manuscrit : un système de décision expert et un système de classification à apprentissage supervisé basé sur des méthodes SVM (Machines à Vecteurs de Support). Ces deux systèmes exploitent les valeurs des indicateurs déterminées lors des phases de caractérisation pour identifier la classe de l'évènement à l'origine de la perturbation détectée. Les classes des évènements qu'ils cherchent à discriminer sont spécifiées au paragraphe 17.2.

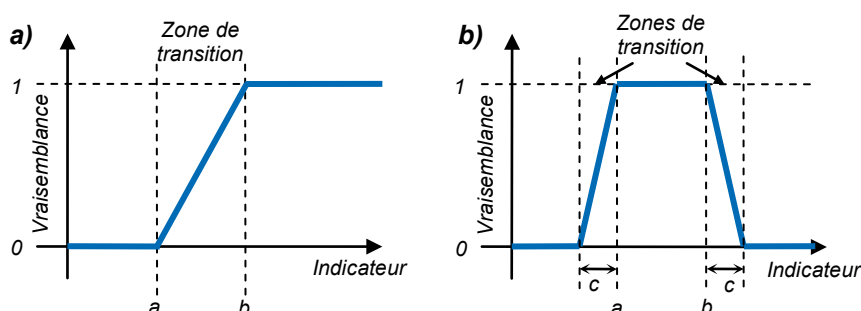
### 17.5.1. Système de décision expert

Le système de décision expert est utilisé pour discriminer différentes classes de perturbations à partir des jeux d'indicateurs calculés lors de la phase de caractérisation. Il leur impose un ensemble de critères qui constituent un gabarit propre à chaque classe de perturbations. Les valeurs de ces critères sont déterminées à partir de l'analyse de la base d'apprentissage constituée par les valeurs des indicateurs calculées à partir d'un très grand nombre de perturbations simulées (Chapitre 18). Deux structures de décision différentes sont définies, une par type de régimes de fonctionnement.

#### 17.5.1.1. Expression des critères

Les critères utilisés par les systèmes experts sont définis en logique floue à partir de fonctions de vraisemblance linéaires par morceaux (Figure 17-4). Une telle fonction est associée à chaque indicateur de reconnaissance pour chaque classe de perturbations. Elle attribue une vraisemblance à la classe de perturbations associée en fonction de la valeur de l'indicateur qu'elle analyse.

Pour chaque indicateur, des intervalles de vraisemblance maximale (1) et minimale (0) sont définis. Les zones de transition, décrites par des fonctions linéaires, sont de taille variable. Ces différentes fonctions de vraisemblance sont désignées, dans ce manuscrit, par le terme générique de « critères ».



**Figure 17-4 – Exemples de fonctions de vraisemblance utilisées par le système expert**

Les fonctions de vraisemblance utilisées par le système ont des formes très simples. Des modèles définissant des transitions plus « douces » entre les intervalles de vraisemblance extrême pourraient également être employés [DAS00]. On a choisi de se restreindre aux cas linéaires par morceaux en raison de leur plus grande simplicité algorithmique. Ils permettent de limiter le coût de la prise de décision dans un système d'analyse des perturbations en quasi-temps-réel.



### 17.5.1.2. Structure de décision à éliminations successives

Différentes structures de décision peuvent être associées à des systèmes de reconnaissance experts. Celle retenue pour analyser les indicateurs de reconnaissance déterminés lors de la phase de caractérisation est une *structure à éliminations successives* [ADB04, KEZ93]. En raison de l'analyse différenciée des régimes de fonctionnement transitoires et permanents, deux formes distinctes sont définies. Elles cherchent à optimiser le coût de la décision en réduisant le nombre d'indicateurs à déterminer et le nombre de tests à réaliser.

Le principe de cette structure à éliminations successives est illustré à la Figure 17-5. On notera que cette figure est purement illustrative. Elle est donnée à titre explicatif mais ne représente pas la manière dont la méthode est implémentée dans le système. De nombreux raffinements sont apportés à cette structure afin d'optimiser son coût et son efficacité. Ils sont présentés au paragraphe 19.1.

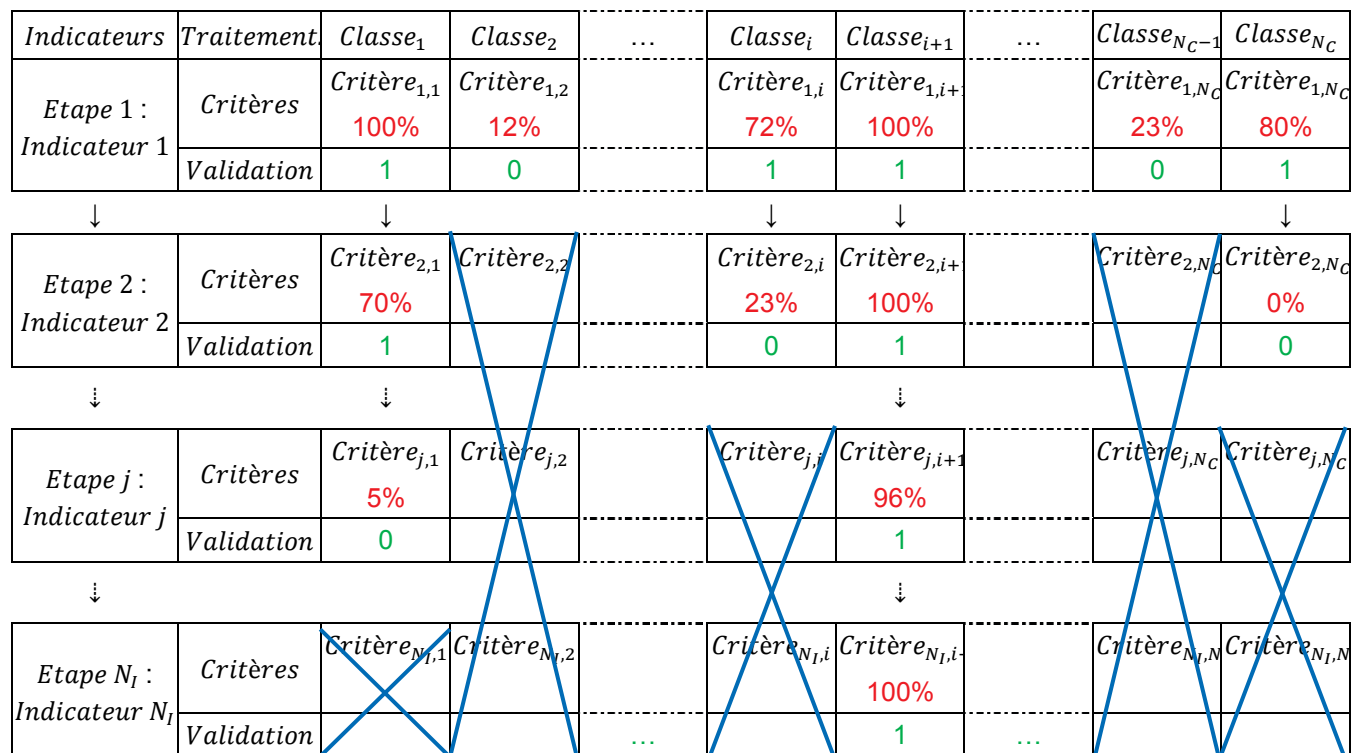


Figure 17-5 – Principe de la structure de décision à éliminations successives

Sous sa forme générique, cette structure de décision est composée d'un nombre d'*étapes d'analyse* équivalent au nombre d'indicateurs utilisés  $N_l$  pour caractériser le régime de fonctionnement analysé. Chacune de ces étapes est assurée par un ensemble de *modules de traitements* agissant en parallèle. Il y a autant de modules que de classes de perturbations  $N_c$  considérées lors de l'analyse du régime de fonctionnement.

La non-validation d'une classe de perturbations par un module de traitements interrompt la série de tests initialement prévus pour cette classe et conduit à son élimination (*vraisemblance* = 0%).

### 17.5.1.3. Composition des modules de traitements

Chaque module de traitements  $module_{j,i}$  de la structure de décision à éliminations successives est composé de deux parties :

#### 1. Calcul de la « vraisemblance locale » de la classe $i$

Lors de cette 1<sup>re</sup> étape, on applique à l'indicateur  $j$  analysé la fonction de vraisemblance ( $Critère_{j,i}$ ) qui lui est associée pour la classe de perturbations  $i$  considérée. On obtient ainsi la vraisemblance de cette classe par rapport à ce critère. Cette vraisemblance est désignée dans ce manuscrit par le terme de « *vraisemblance locale* ».

Dans l'exemple de la Figure 17-5, la valeur de la vraisemblance locale déterminée après l'application de chaque critère est indiquée en *rouge*.

#### 2. Validation de la classe $i$

Une fois la *vraisemblance locale* de la classe  $i$  déterminée, la poursuite de l'analyse est conditionnée par une étape de validation. Si la *vraisemblance locale* est supérieure à 50%, l'analyse de l'indicateur suivant par le module de traitements ( $j+1,i$ ) est autorisée. Sinon, la vraisemblance de la classe  $i$  est mise à zéro et l'analyse est arrêtée.

Le résultat de cette étape de validation est un résultat binaire  $\{0,1\}$ . Il est indiqué en *vert* dans la seconde ligne des modules de traitement à la Figure 17-5. Les modules de traitements non effectués y sont barrés par une *croix bleue*.

À l'issue de chaque étape d'analyse, les résultats des étapes de validation indiquent directement quelles classes ont une vraisemblance suffisante. Chaque étape contribue à réduire l'ensemble des classes susceptibles de correspondre à la signature de la perturbation observée. Le nombre de modules de traitements à effectuer, ainsi que le coût de la discrimination, diminuent progressivement dans des proportions identiques.

Cette structure de discrimination présente l'avantage de restreindre rapidement le nombre de tests à réaliser. Son gain est maximum lorsque les couples d'indicateurs et de critères appliqués au cours des premières étapes ont un fort pouvoir discriminant. La maximisation de l'efficacité de la structure de décision est l'objectif poursuivi par la phase de calibrage présentée au paragraphe 19.1.

#### Remarque 7 : Classe « événements non-considérés »

La classe d'événements non-considérés est traitée différemment par le système expert et par le système de décision basé sur une architecture SVM. On rappelle qu'elle regroupe un ensemble de classes d'événements différents selon le régime de fonctionnement analysé (cf. 17.2, Tableau 4).

Pour les systèmes experts, cette classe n'a pas besoin d'être définie explicitement par une suite de décisions logiques : si aucune classe de perturbations n'obtient une vraisemblance suffisante en fin

d'analyse, le régime de fonctionnement analysé est automatiquement assimilé à cette classe. Cette logique est naturelle, puisque les perturbations appartenant à cette classe ne sont pas recherchées pour le régime de fonctionnement considéré.

Les domaines de variation des indicateurs correspondant à cette classe doivent par contre être pris en compte afin de limiter le taux de fausses identifications : il ne suffit pas de considérer les seules classes recherchées pour établir des critères de décision robustes.

### 17.5.2. Système de décision à apprentissage supervisé

#### 17.5.2.1. Principe des SVM

Les systèmes de décision à apprentissage supervisé ne requièrent pas la définition d'une structure décisionnelle ordonnancée. Ils exploitent directement les données de la base d'apprentissage pour les classer. La méthode utilisée dans ce manuscrit est une Machine à Vecteurs de Support (SVM). Elle fournit des classifieurs linéaires capables de traiter des problèmes de discrimination non-linéaires. La Figure 17-6 illustre le résultat d'une telle classification appliquée à un problème tri-classes dans un espace bidimensionnel.

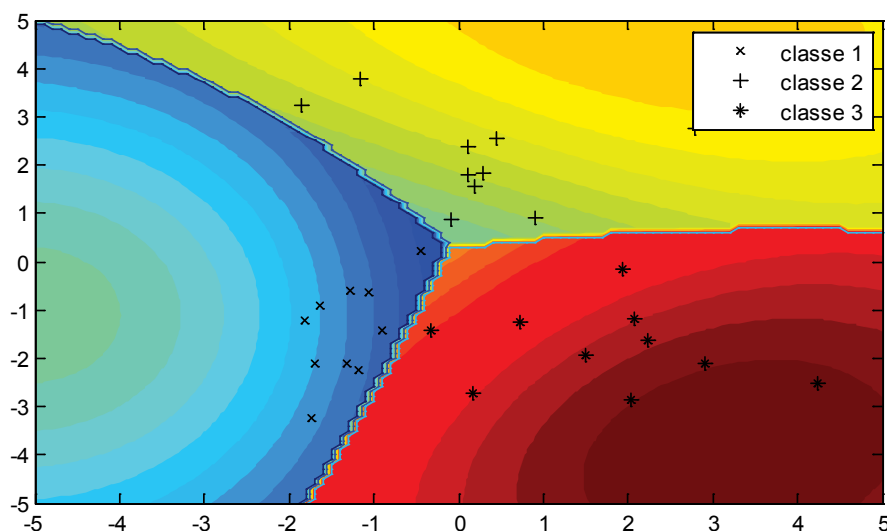


Figure 17-6 – Séparation de trois classes dans un espace bidimensionnel par SVM

Dans ce paragraphe, nous rappelons les deux notions fondatrices des SVM qui contribuent largement à leurs bonnes performances [VAP98]. Une présentation plus détaillée est fournie en Annexe D.

- ✓ Les SVM sont des classifieurs à « *marge maximale* ». Ils maximisent la distance entre la frontière de séparation des classes et les échantillons les plus proches de chaque classe d'évènements considérée. Ces échantillons sont désignés par le terme de *vecteurs de support*. La largeur de cette marge reflète l'erreur de généralisation du classifieur attendue. Plus elle est importante, plus les erreurs de classification risquent d'être faibles [BEN03]. La frontière séparatrice optimale est déterminée en résolvant un problème d'optimisation quadratique [GUN98].

- ✓ Pour faciliter la recherche de cette marge optimale, les SVM transforment l'espace de description initial constitué par les indicateurs en un *espace de redescription de plus grande dimension*. Cette transformation est réalisée à l'aide d'une « *fonction noyau* » [BEN03, GUN98]. Elle s'avère nécessaire dans les cas où les données observées ne sont pas linéairement séparables. En passant dans un espace de dimension supérieure, il est plus probable que de tels séparateurs existent [BUR98].

La transformation de l'espace de description et les hyperplans séparateurs optimaux sont déterminés à partir des données de la base d'apprentissage. Ils sont ensuite utilisés pour classer les nouvelles perturbations observées. La méthode d'apprentissage du modèle des données à partir des perturbations simulées est présentée au Chapitre 19.

Dans ce manuscrit, les classifieurs SVM utilisés sont tous basés sur des noyaux gaussiens. Des SVM avec noyaux polynomiaux ont également été étudiés. Ils offrent des performances de discrimination similaires après optimisation de leurs hyperparamètres par validation-croisée (§19.2.2).

### 17.5.2.2. Mise en œuvre des classifieurs SVM

Les SVM sont très différentes des systèmes de décision experts. Elles réalisent, entre autres, l'apprentissage automatique de la structure des classes de la base d'évènements simulés. Cette automatisation nécessite la prise en compte de plusieurs éléments avant leur mise en œuvre.

#### **Définition d'une classe « non-événement »**

Le système de classification des perturbations par SVM est tel que tout nouvel événement est nécessairement attribué à l'une des classes spécifiées. Ce comportement diffère de celui des systèmes experts pour lesquels aucune perturbation n'est identifiée si aucune branche de son arborescence décisionnelle n'aboutit, c'est-à-dire présente une vraisemblance suffisante.

Dans le cas des SVM, cette caractéristique joue en sa défaveur si elle n'est pas correctement traitée. Des fausses alarmes risquent de survenir en présence de segmentations ne reflétant pas d'évolutions électrotechniques majeures. Si ces cas sont rares (<5% avec la méthode proposée en Partie 2), ils sont problématiques, car ils ont tendance à fournir un diagnostic pessimiste : en présence de fausses segmentations, le système de reconnaissance peut identifier un événement sans que le réseau ne soit affecté de manière significative.

La définition d'une classe « non-événement » est donc nécessaire pour améliorer la robustesse du système de reconnaissance SVM. Les valeurs des indicateurs utilisées pour créer cette classe n'ont pas été déterminées par simulations. Les fluctuations des formes d'onde à l'origine des fausses détections du système de segmentation sont en effet difficilement reproductibles. Elles ont été obtenues à partir de l'*analyse d'enregistrements réels* sur lesquels de tels phénomènes ont été observés. Les valeurs des indicateurs déterminées ont servi de support à la construction de cette base. Les informations recueillies lors du calibrage du système expert ont également été utilisées. Il a

permis, non seulement d'identifier les plages de variation des indicateurs en présence de perturbations, mais également de déduire celles observées en leur absence.

En raison de l'analyse différenciée des régimes de fonctionnement transitoires et permanents, deux classes de type « non-événement » distinctes sont définies. Ces classes peuvent être incluses dans la classe des « événements non-considérés » ou traitées séparément comme une classe à part entière. Dans ce document, on a opté pour leur intégration aux classes des « événements non-considérés » (signalées par le sigle \* dans le Tableau 4 du paragraphe 17.2).

### Standardisation des indicateurs

Divers indicateurs sont utilisés pour caractériser les perturbations affectant les réseaux à moyenne tension. Certains analysent des variations de tensions et de courants, d'autres renseignent sur la présence d'un signal dans une plage de fréquences. Ils prennent des valeurs très différentes, avec des rapports supérieurs à  $10^3$  entre les extrema des plages de valeurs de certains indicateurs. Cette grande variabilité nuit à la discrimination des classes de perturbations. Les indicateurs évoluant dans une plage de valeurs élevées exercent une influence plus importante et risquent de biaiser les processus d'apprentissage et de classification [HSU03].

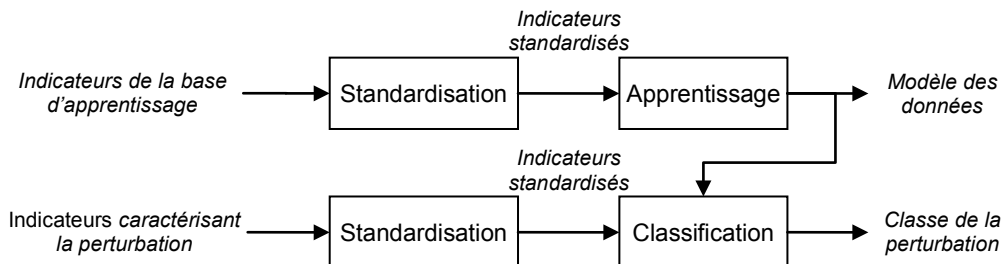
Afin de s'affranchir de ce problème, on standardise les indicateurs déterminés à partir des simulations des perturbations avant de débiter l'apprentissage du modèle des données. Cette standardisation consiste à rééchelonner linéairement les valeurs des indicateurs sur l'intervalle  $[-1,1]$  (17-1). Cet intervalle est choisi car il fournit généralement de meilleures performances que des intervalles non centrés comme l'intervalle  $[0,1]$  [SAR97].

$$\boxed{\text{Indicateur} \in [b_{inf}, b_{sup}] \xrightarrow{f(x)=(x-m)/\Delta} \text{Indicateur}_{standard} \in [-1,1]} \quad (17-1)$$

Où :  $m = (b_{sup} + b_{inf})/2$  et  $\Delta = (b_{sup} - b_{inf})/2$

Les bornes  $b_{inf}$  et  $b_{sup}$  des plages de variations des indicateurs n'étant pas précisément connues, le domaine de variations obtenu après standardisation n'est jamais égal à  $[-1,1]$ . Leurs valeurs doivent être estimées afin de réduire au maximum le biais de la classification. Elles sont fixées à partir du dépouillement des simulations et de nos propres connaissances.

Cette étape de standardisation est incontournable et concerne aussi bien la phase d'apprentissage de la structure des indicateurs décrivant les perturbations que celle de classification (Figure 17-7).



**Figure 17-7 – Intégration de l'étape de standardisation dans les phases d'apprentissage et de classification des perturbations**

## Chapitre 18 – Constitution des bases de connaissances

### 18.1. Objectifs

Les indicateurs de reconnaissance présentés en Partie 2 informent sur le comportement des perturbations en régimes permanents et transitoires et déterminent leur signature caractéristique. Quel que soit le système de décision utilisé, la définition des critères de classification requiert une base de données suffisante pour chaque classe d'évènements. Elle permet de déterminer les domaines d'existence de chaque classe dans la base de représentation constituée par les indicateurs de reconnaissance. Un grand nombre de configurations, propres au réseau et à la perturbation, doit être analysé pour parcourir efficacement ces domaines.

Pour une première exploration, on se fonde sur un large panel d'enregistrements d'évènements réels. Les parties des domaines qu'ils couvrent sont toutefois limitées car le nombre de configurations du réseau auxquelles ils correspondent est insuffisant.

Afin de compléter les informations fournies par ces enregistrements et effectuer l'apprentissage des systèmes de décision, on réalise de très nombreuses simulations temporelles pour chaque catégorie de perturbations. Ces simulations se basent sur des réseaux de distribution HTA génériques dont on fait varier un grand nombre de paramètres (longueur et type des lignes, puissance de court-circuit du réseau amont, localisation de la source de la perturbation, puissance des charges...). Cette modularité permet de couvrir un maximum de configurations pour chacune des perturbations recherchées, c'est-à-dire les défauts, les phénomènes d'enclenchements de départs et de batteries de condensateurs, les raccordements de charges...

Chaque perturbation simulée est observée par différents points de mesure sur le réseau (Figure 18-1). Grâce à ces multiples observations, l'impact des perturbations est évalué au niveau du jeu de barres des postes sources comme à celui des postes de livraison. Un panel de configurations et de points de mesure envisagés est présenté en Annexe B.

Les évènements simulés sont analysés au fur et à mesure. Après chaque simulation, les formes d'onde des perturbations sont segmentées et les caractéristiques recherchées par les indicateurs de reconnaissance calculées. Les signatures de chaque perturbation sont déterminées pour l'ensemble des points d'observation du réseau considérés. Elles alimentent directement les bases d'évènements utilisées pour l'apprentissage de nos systèmes de reconnaissance.

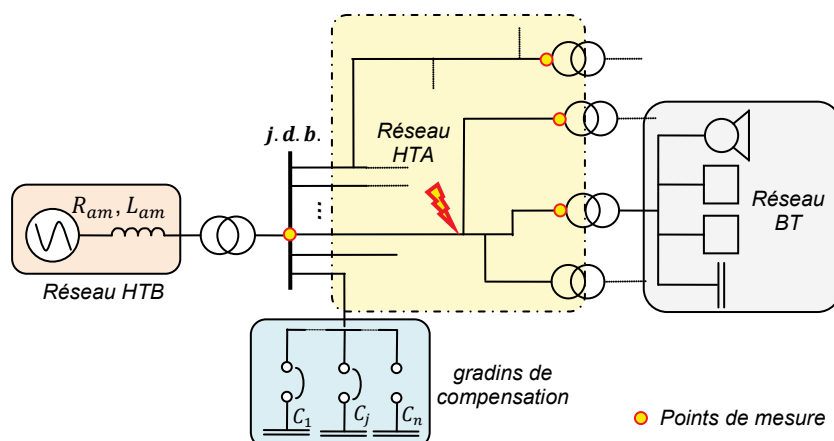


Figure 18-1 – Points de mesure considérés sur un réseau-type

## 18.2. Configurations des réseaux d'étude

Afin d'explorer au mieux les domaines d'existence des différentes classes de perturbations, plusieurs réseaux-types sont utilisés comme supports des simulations paramétriques. Ils varient aussi bien au niveau de leur constitution (nombre de départs, arborescence des départs, régime de neutre...) que des paramètres de leurs composants (type et longueur de lignes, puissance, couplage et caractéristique de saturation des transformateurs, puissance et facteur de puissance des charges...).

Les réseaux utilisés correspondent soit à des réseaux urbains ayant une forte composante souterraine, soit à des réseaux ruraux mixtes pour lesquels les lignes aériennes sont prépondérantes. Leurs paramètres, tels que la puissance de court-circuit du réseau amont, la structure des départs, les caractéristiques des transformateurs du poste source et des postes HTA/BT, sont adaptés en conséquence.

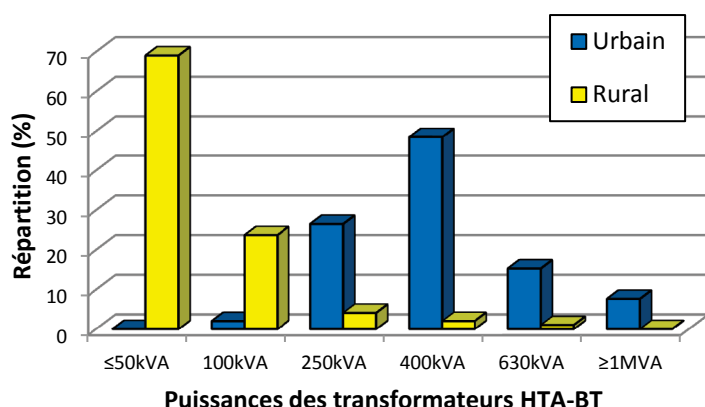


Figure 18-2 – Exemple de répartition des puissances des transformateurs de livraison HTA-BT pour un réseau rural et un réseau urbain

(le pourcentage indique la proportion de chaque type de transformateurs par rapport à leur nombre total)

Les bornes de l'intervalle de variations des paramètres intervenant lors de la simulation ainsi que leurs modes d'évolution dépendent essentiellement du réseau et du type de perturbations simulées. Par exemple, pour les enclenchements de départs, le régime de neutre du réseau n'influence pas le

comportement des perturbations de manière significative. Le nombre de jeux d'impédances de mise à la terre utilisés lors des simulations est par conséquent plus faible que dans le cas de l'étude des défauts monophasés. Par contre, d'autres paramètres, comme la répartition des puissances des transformateurs du départ réenclenché (Figure 18-2), sont prépondérants pour cette perturbation. Ils impactent, entre autres, la caractéristique de saturation équivalente du départ réenclenché.

Des paramètres indépendants du type du réseau, tels que le facteur de puissance, sont traités différemment puisqu'ils varient dans des proportions similaires quel que soit le type de perturbations considéré. Le Tableau 5 présente les plages de variations des principaux paramètres des réseaux-types employés pour simuler des réseaux urbains et ruraux.

Réseaux	Type urbain	Type rural
<b>Caractéristiques du réseau amont :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Puissance de court-circuit</li> <li>Niveau de tension</li> </ul>	{500, 1000, 2000} MVA 225kV	{200, 500, 1000} MVA 63kV
<b>Transformateur du poste source</b>	{40, 70} MVA	{10, 20, 36} MVA
<b>Facteur de puissance au poste source</b>	[-0.1 ... 0.2]	
<b>Régime de mise à la terre :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Impédant <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Secondaire en étoile</li> <li>✓ Secondaire en triangle</li> </ul> </li> <li>Compensé</li> </ul>	(1000A) 12Ω BPN 12Ω + R 12Ω BPN 12Ω + Z	(300A) 40Ω BPN 12Ω + R 40Ω BPN 12Ω + Z
<b>Longueur des lignes du départ :</b>	$\Sigma = [3 \dots 15]$ km	$\Sigma = [5 \dots 40]$ km
<b>Caractéristiques des départs :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Nombre</li> <li>Puissance par départs</li> </ul>	6-10 [2 ... 8] MVA	4-7 [1 ... 4] MVA
<b>Transformateurs des postes de livraison<sup>1</sup></b>	{250, <u>400</u> , <u>630</u> , <u>1000</u> , 1250} kVA	{50, <u>100</u> , 250, 400, 630, 1000} kVA
<b>Caractéristiques des charges :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Facteur de puissance</li> <li>Taux de charge</li> </ul>	[0.2 ... 0.6] [0.20 ... 1.00]	[0.2 ... 0.6] [0,10 ... 0.80]

**Tableau 5 – Plages de variations des principaux paramètres des réseaux ruraux et urbains simulés lors de l'étude paramétrique**

L'Annexe B présente un des réseaux d'étude utilisé pour la simulation des perturbations survenant sur les réseaux ruraux. La topologie générique d'un de ses départs y est également présentée.

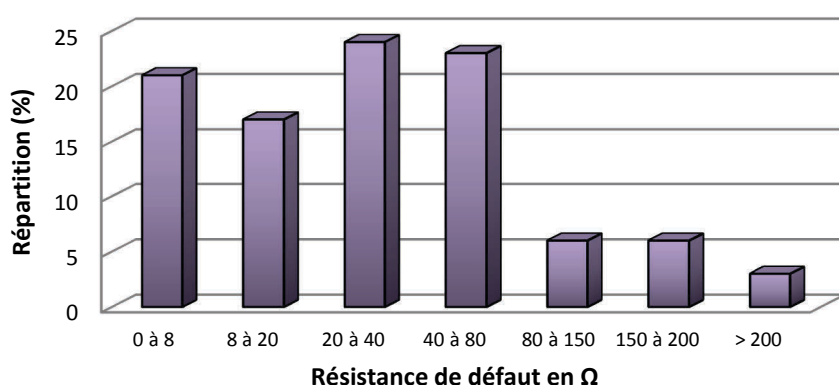
<sup>1</sup> Les puissances soulignées correspondent aux puissances des transformateurs de livraison majoritaires sur ce type de départs



### Remarque 8 : Répartition statistique des paramètres de simulation

On notera que l'on ne cherche pas à ce que les valeurs prises par les paramètres des réseaux soient représentatives des distributions statistiques des événements observés sur les réseaux réels. Si tel était le cas, on privilégierait les perturbations les plus fréquentes au détriment d'événements plus rares mais dont la caractérisation et la bonne reconnaissance sont essentielles.

Par exemple, pour les défauts monophasés, les valeurs des résistances de défaut simulées ne suivent pas la distribution présentée à la Figure 18-3 mais parcourent régulièrement un intervalle compris entre 1  $\Omega$  et 1 k $\Omega$  [EDF94a]. On caractérise ainsi indifféremment les défauts faiblement et fortement résistants.



**Figure 18-3 – Répartition des résistances des défauts monophasés permanents [EDF94a]**

### 18.3. Démarche des simulations paramétriques

Les formes d'onde des perturbations simulées sont traitées de manière à déterminer l'important panel d'indicateurs qui est utilisé pour caractériser leurs régimes de fonctionnement. La base d'apprentissage ainsi constituée permet d'apprécier les domaines d'existence de chaque classe d'événements dans la base de représentation des indicateurs. Un grand nombre de simulations doit être effectué pour que la base d'apprentissage comporte l'ensemble des types d'événements affectant les réseaux réels. Il s'agit de réaliser la meilleure exploration possible de ces domaines pour que les systèmes de décision entraînés à partir de ces simulations soient généralisables aux enregistrements des perturbations réelles.

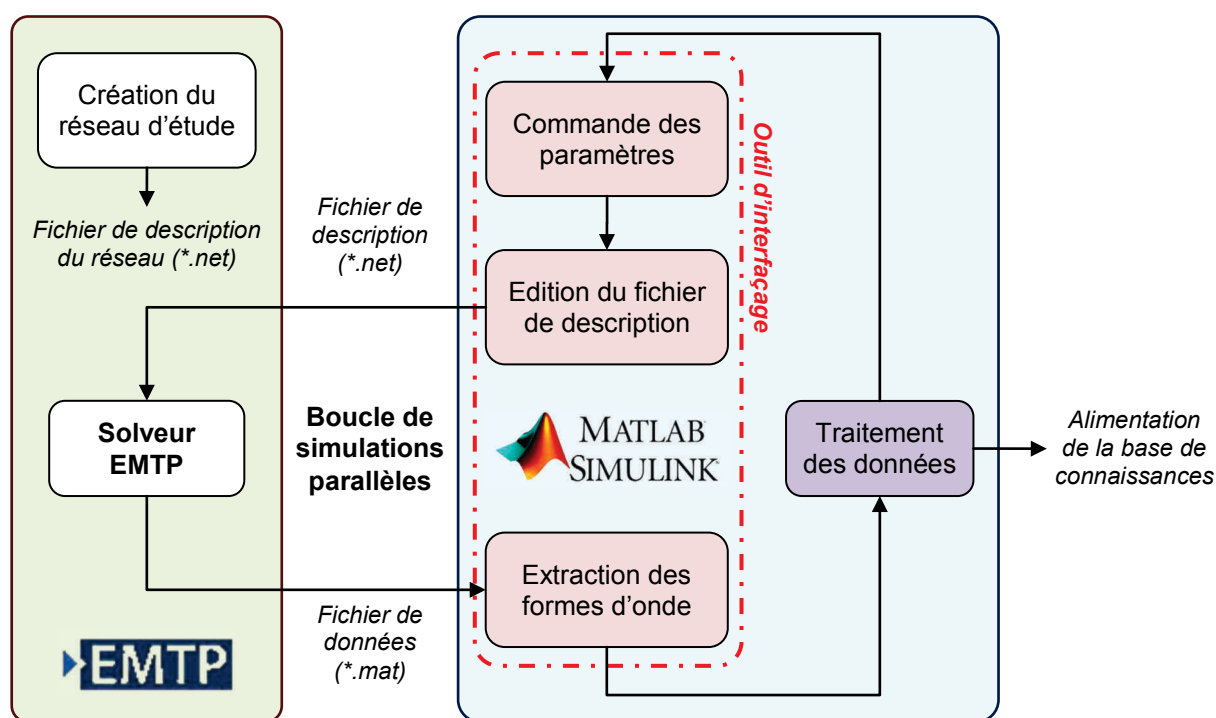
À cet effet, nous avons développé un outil permettant de réaliser et de traiter les simulations de manière automatique. Il interface le logiciel de simulation électrotechnique EMTP-RV® avec le logiciel de traitement automatique des formes d'onde développé sous Matlab® (Figure 18-4).

#### Mise en œuvre de l'outil d'interfaçage

L'outil d'interfaçage développé utilise le fichier de description du réseau d'étude préalablement créé par l'utilisateur au sein du logiciel EMTP-RV®. Une fois cette étape réalisée, l'utilisateur n'a plus à interagir avec le logiciel de simulation électrotechnique. L'outil gère intégralement le paramétrage du

réseau et les appels du moteur de calcul.

Dans un second temps, l'outil interprète le fichier de description du réseau. Il en extrait la liste des paramètres du réseau (longueur des lignes, puissance des charges...) ainsi que la liste des points de mesure à partir desquels le réseau est observable. L'utilisateur sélectionne ensuite les paramètres du réseau à faire évoluer, leur fixe des contraintes (valeurs minimale et maximale autorisées) et précise leur mode d'évolution. Il choisit également quels points d'observation du réseau analyser. Toutes ces opérations définissent et initialisent les modes de commande des simulations.



**Figure 18-4 – Démarche de simulation paramétrique suivie par l'outil d'interface entre le logiciel EMTP-RV® et le traitement automatique des formes d'onde**

À la suite de ces deux étapes d'initialisation, l'outil gère de manière automatique les processus de commande, de simulation et de traitement des données simulées :

1. Il commande l'évolution des paramètres du réseau en fonction des contraintes imposées par l'utilisateur et des résultats des traitements précédents. Ceci conduit à définir, à chaque itération, un nouveau jeu de paramètres du réseau simulé.
2. Il simule le réseau nouvellement défini.
3. Il exporte les formes d'onde simulées obtenues aux points de mesure considérés.
4. Il traite les formes d'onde obtenues pour chaque point de mesure, c'est-à-dire les segmente, calcule les jeux d'indicateurs de reconnaissance et les intègre à la base de données.

Toutes ces opérations sont indépendantes et sont réalisées en parallèle.

### **Fonctionnalités de l'outil d'interfaçage**

L'outil d'interfaçage intègre plusieurs méthodes permettant de commander les paramètres du réseau. Un pavage régulier de l'espace d'observation peut être défini à partir des valeurs extrémales des paramètres, c'est-à-dire de leurs contraintes minimales et maximales. Il peut également leur attribuer une distribution statistique et définir des relations algébriques entre différents paramètres du réseau. Cette dernière propriété est particulièrement utile pour déterminer la puissance réactive à compenser ou pour accorder les réseaux à neutre compensé. Elle permet également de paver l'espace des paramètres avec des maillages de types « fonction exponentielle » ou « fonction puissance ».

Toutefois, ces modes d'évolution sont insuffisants pour certains événements. Ils ne permettent pas d'explorer précisément les domaines d'existence des perturbations sans utiliser un maillage de l'espace d'observation très fin et requièrent de réaliser un très grand nombre de simulations. Cette caractéristique s'avère rapidement problématique, car la durée d'une boucle de simulations et de traitement s'échelonne entre 1 et 2 minutes. Cette durée est fonction de la durée de l'intervalle de temps simulé, du pas de calcul et du nombre de points d'observation considérés sur le réseau simulé. Malgré les capacités de parallélisme de l'outil, le temps requis explose rapidement.

Afin de limiter le nombre de simulations, une méthode optimisant la stratégie de simulations est implémentée. Son emploi s'impose lorsque le comportement des indicateurs décrivant les perturbations est complexe. Cette méthode procède en deux étapes. Elle approxime le comportement des indicateurs, puis elle commande l'évolution des paramètres du réseau simulé de manière à améliorer l'évaluation de leur comportement. Ces deux actions sont assurées respectivement par une méthode d'interpolation par *krigeage* [LOP02, BAI05] et par une méthode d'optimisation basée sur le critère *EI* (*Expected Improvement*) [BIL09, VAZ10]. La stratégie de commande des simulations par ce couple de méthodes est détaillée au paragraphe suivant. Leur principe est présenté en Annexe C.

## **18.4. Optimisation de la stratégie de simulations**

### **18.4.1. Contexte d'utilisation**

Les réseaux de distribution ont une architecture extrêmement variée. Topologie, puissances des charges, longueurs et types de lignes, régimes de mise à la terre... sont autant de degrés de liberté à prendre en compte lors de leur simulation.

Ce contexte explique que de nombreuses simulations doivent être réalisées pour permettre l'exploration des domaines d'existence des différentes classes d'événements recherchées. Ces simulations renseignent tant sur l'intérieur des domaines que sur leurs frontières afin de permettre une classification efficace des perturbations.

La stratégie de simulations utilisée cherche à remplir cet objectif en maintenant le nombre de

simulations à un niveau acceptable. Elle comporte plusieurs étapes.

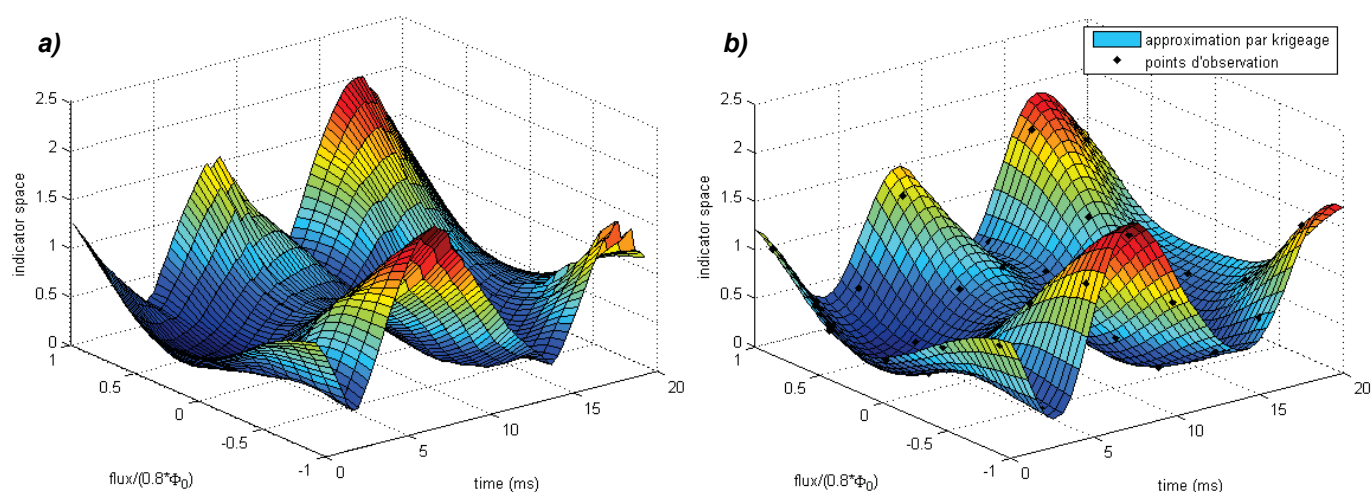
Dans un premier temps, l'ensemble des degrés de liberté est examiné. On y recherche ceux dont l'influence sur le comportement de la perturbation est prépondérante. Cette analyse permet de restreindre le nombre de dimensions de l'étude aux seuls paramètres ayant un impact significatif sur les signatures des perturbations. Cette étude est réalisée pour chaque type de perturbations afin de tenir compte de ses spécificités.

Dans un second temps, la méthode de commande des paramètres est définie. Elle est fonction de la complexité du comportement des indicateurs vis-à-vis d'un ou de plusieurs paramètres du réseau.

Pour un défaut monophasé par exemple, l'impact de la résistance du défaut sur les variations des indicateurs est immédiat : pour une même configuration, leurs variations extrémales sont obtenues aux bornes de l'intervalle de définition de la résistance de défaut tandis que les valeurs de résistance intermédiaires assurent le peuplement de l'intérieur du domaine. La prévisibilité du comportement de l'indicateur vis-à-vis de ce paramètre autorise l'utilisation d'un maillage lâche et régulier de l'espace d'observation. Un comportement identique est également constaté pour une large majorité des paramètres de simulation (puissances et facteurs de puissance des charges, position de la source de la perturbation...).

Mais, dans certains cas, un maillage lâche de l'espace d'observation ne permet pas une exploration suffisante des domaines d'existence avec un nombre raisonnable de simulations. De telles situations se produisent lorsque les indicateurs se comportent de manière complexe vis-à-vis de plusieurs paramètres du réseau. C'est par exemple le cas pour les enclenchements de départ. Pour ces événements, l'instant d'enclenchement du départ et la distribution du flux rémanent dans les noyaux des transformateurs perturbateurs impactent fortement le comportement de certains indicateurs (Figure 18-5) [CAU10b]. Avec un maillage réduit, l'estimation des extrema des indicateurs est fortement dégradée et on risque de sous-estimer le domaine d'existence de l'indicateur. Inversement, un maillage plus resserré requiert la réalisation d'un nombre de simulations beaucoup trop important.

La stratégie de commande des simulations mise en place distingue deux types de paramètres : ceux dont l'influence sur le comportement de l'indicateur est quasi-immédiate et ceux pour lesquels elle est beaucoup plus complexe. C'est dans cette optique que le krigeage et l'optimisation par critère EI sont utilisés. La méthode d'interpolation par krigeage (Annexe C.1) estime le comportement de l'indicateur dans l'espace d'observation et la méthode EI (Annexe C.2) fournit les paramètres de simulation permettant d'améliorer l'estimation des extrema des indicateurs. Une telle stratégie permet d'obtenir une caractérisation fiable des domaines d'existence des indicateurs tout en réduisant de façon très importante le nombre de simulations à réaliser [CAU10b]. À titre d'illustration, le comportement de l'indicateur de la Figure 18-5-a obtenu avec 1600 points de simulations peut être comparé à son estimation par krigeage à partir de 30 points (Figure 18-5-b).



**Figure 18-5 – Comportement d'un indicateur lié à l'intensité de l'appel de courant à l'enclenchement pour des instants d'enclenchement et des valeurs de flux rémanent différents**

**a) Evaluation à partir 1600 points d'observations**

**b) Interpolation par krigeage à partir de 30 points**

### 18.4.2. Commande des simulations

La stratégie de simulations présentée au paragraphe précédent est utilisée pour explorer les domaines d'existence des différentes classes d'évènements. La commande des paramètres de simulations qui en résulte est réalisée de manière « hybride » (Figure 18-6). Une large partie des paramètres du réseau suit un maillage régulier lâche défini par l'utilisateur. Le reste est commandé de manière à limiter le nombre de simulations à réaliser.

#### **Maillage lâche des paramètres à l'influence « prévisible »**

Un maillage lâche est utilisé pour les paramètres dont l'impact sur le comportement des indicateurs est immédiat. Ce maillage réduit – de 2 à 4 valeurs par dimension – garantit la présence d'une population d'évènements suffisante sur les frontières et dans le corps du domaine d'existence de chaque classe de perturbations. On ne peut pas se contenter de rechercher les seules valeurs extrémales car la mise au point des systèmes de décision experts et à apprentissage supervisé requiert les deux types d'informations.

#### **Stratégie d'échantillonnage pour les paramètres à l'influence complexe**

Les paramètres induisant un comportement de l'indicateur plus complexe sont traités différemment. Ils exploitent le maillage du sous-espace d'observation (espace des paramètres « simples ») défini précédemment. Chaque point de ce maillage multidimensionnel correspond à une configuration du réseau différente. Pour chacun d'eux, les paramètres d'influence complexe sont commandés de manière à informer sur le comportement de l'indicateur tout en limitant le nombre de simulations.

La stratégie de simulation utilisée à cette fin comporte plusieurs étapes (Figure 18-6).

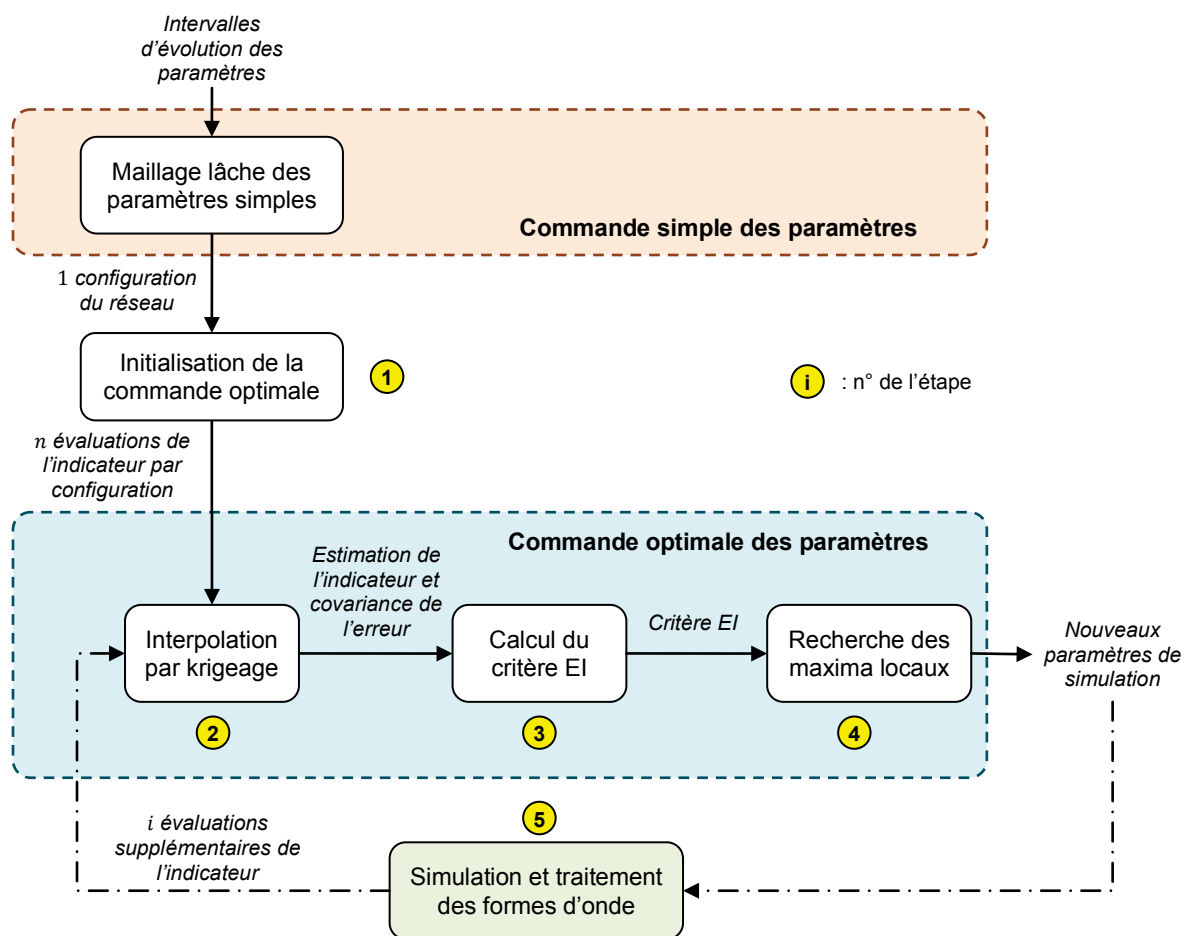


Figure 18-6 – Schéma de commande hybride des simulations paramétriques

1. L'estimation et la recherche des extrema des indicateurs sont initialisées. Un nombre restreint de points  $(x_1, \dots, x_n)$  de l'espace d'observation  $D$  est sélectionné et la valeur  $Z(x_i)$  indiquant le comportement  $Z$  de l'indicateur est déterminée pour chacun de ces points. Cette étape requiert la réalisation préalable de  $n$  boucles de simulations–traitements par configuration du réseau étudié.
2. Le comportement de l'indicateur est estimé sur l'ensemble de l'espace d'observation à partir des évaluations précédentes ( $n$  lors de l'initialisation +  $i$  suite aux itérations précédentes). Le procédé d'interpolation spatiale par krigeage est utilisé à cet effet.
3. Le critère décisionnel  $EI$  est déterminé à partir de l'estimation du comportement de l'indicateur et de sa covariance. Ce critère quantifie l'amélioration potentielle d'une caractéristique associée à tout point de l'espace d'observation susceptible d'être analysé. Dans notre cas, il s'agit de l'évaluation des extrema de l'indicateur sélectionné.
4. Les maxima locaux du critère  $EI$  sont recherchés. Ces maxima indiquent les points de simulations susceptibles d'améliorer l'évaluation des extrema globaux de l'indicateur dans la configuration étudiée. Elle permet de guider l'échantillonnage de l'espace d'observation en

fournissant un nouveau point de simulation à l'issue de chaque itération ( $x_{n+1}$ ).

5. Le réseau électrique est à nouveau simulé au point de l'espace d'observation sélectionné. La perturbation est analysée et le comportement  $Z(x_{n+1})$  de l'indicateur à ce point est déterminé.

Les étapes 2 à 5 sont répétées itérativement jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit atteint.

Cette stratégie d'échantillonnage de l'espace d'observation est illustrée dans le document [CAU10b]. Elle y est utilisée pour traiter le comportement des indicateurs en présence de perturbations induites par les enclenchements de départs.

Au final, cet outil de simulations paramétriques a permis de constituer une base de données d'indicateurs à partir de l'analyse d'environ 1 million de simulations, c'est-à-dire de près de 8 millions d'observations de perturbations. Elle est l'aboutissement de plus de 3 mois de simulations réalisées en continu. Ce nombre conséquent reflète le large panel de perturbations recherchées, les multiples configurations envisagées ainsi que les différentes topologies du réseau de distribution HTA considérées. Si aucune démarche d'optimisation du plan d'expérience n'avait été envisagée, la quantité de simulations à réaliser se serait *a minima* accrue d'un facteur 20.

C'est cette vaste base de connaissances qui est utilisée pour l'apprentissage et le test des systèmes de reconnaissance développés.

## Chapitre 19 – Mise au point des systèmes de décision

Les systèmes de décision expert et SVM utilisent plusieurs jeux d'indicateurs pour discriminer les classes de perturbations recherchées. Afin de garantir de bonnes performances de classification, les critères qu'ils emploient sont spécifiés au cours d'une phase d'apprentissage qui dépend du système de décision et des objectifs d'optimisation qu'on lui impose.

Le processus d'apprentissage et de validation appliqué aux systèmes de reconnaissance développés consiste en deux étapes successives.

- ✓ La première étape se fonde sur la base de connaissances constituée à l'issue des simulations paramétriques présentées au chapitre précédent. Elle rassemble l'ensemble des valeurs des indicateurs déterminées lors de l'analyse des formes d'onde des événements simulés. Pour les systèmes experts, leur architecture de décision et les gabarits imposés aux jeux d'indicateurs sont déterminés à partir de son analyse. Pour les classifieurs SVM, leur apprentissage consiste à optimiser leurs hyperparamètres en évaluant leurs performances par validation-croisée obtenues à partir de cette même base.

Les démarches d'apprentissage utilisées pour optimiser les performances des deux systèmes de reconnaissance sont traitées dans ce chapitre.

- ✓ Au cours de la seconde étape, les performances de ces deux types de classifieurs sont évaluées à partir d'un large panel de perturbations réelles mesurées en divers points du réseau de distribution d'ERDF par différents types d'appareils de qualimétrie.

Les résultats de cette évaluation et leur analyse sont présentés au Chapitre 20.

### 19.1. Calibrage des critères des systèmes experts

Les systèmes experts développés pour discriminer les perturbations électrotechniques survenant sur les réseaux de distribution HTA utilisent une structure à éliminations successives (§17.5.1). Leur mise au point nécessite de réaliser deux actions :

- ✓ définir, pour chaque classe de perturbations, les critères qui sont appliqués aux indicateurs,
- ✓ définir l'architecture de décision, c'est-à-dire l'organisation et l'ordonnancement des étapes d'analyse des indicateurs.

Le système de reconnaissance développé poursuit l'objectif d'analyser les formes d'onde des perturbations en quasi-temps-réel. Parallèlement à l'optimisation de ses performances, on cherche à limiter son coût calculatoire.



### 19.1.1. Objectifs de l'optimisation des systèmes expert

Telle que présentée à la Figure 17-5, la structure de décision à éliminations successives est peu efficace. Quelle que soit la classe d'évènements considérée, le système réalise toujours l'ensemble des  $N_i$  étapes d'analyse. Or, pour certaines classes de perturbations, l'examen d'un grand nombre d'indicateurs s'avère inutile. Comme certains d'entre eux sont dédiés à des classes de perturbations particulières (détection de la présence d'une composante fréquentielle à 175 Hz pour les signaux tarifaires par exemple), leur analyse pour toutes les classes ne présente pas forcément d'intérêt.

Afin d'optimiser la structure du système et d'augmenter ses performances, plusieurs règles sont définies. Chacune répond à un objectif précis qui doit être atteint par le système.

#### **Limitation du coût calculatoire de la structure décisionnelle**

Le système d'analyse devant analyser en temps-réel les perturbations mesurées, il convient de réduire son coût calculatoire au maximum. Or, celui-ci ne réside pas tant dans les tests des indicateurs (qu'on a voulu très simples) que dans le calcul des grandeurs qu'ils analysent (valeurs efficaces, composantes symétriques, coefficients de modèles paramétriques...).

La réduction de ce coût dépend fortement des caractéristiques recherchées et de leur mode de calcul. Elle doit tenir compte des liens existant entre les différents indicateurs. Par exemple, pour analyser les régimes permanents, des indicateurs analysant les composantes symétriques des tensions et des courants sont déterminés. Le calcul des trois composantes symétriques d'un système triphasé pouvant être réalisé de manière simultanée par une opération matricielle, on cherche à exploiter au maximum toutes les informations que ces grandeurs apportent avant d'en calculer de nouvelles. Ainsi, les indicateurs pouvant être déterminés de manière simultanée sont regroupés en blocs et analysés de manière séquentielle.

Cette méthode de regroupement des indicateurs n'est pas nécessairement optimale du point de vue de la seule vitesse de discrimination mais elle limite fortement le coût du processus de reconnaissance. On rappelle qu'une telle approche est impossible avec des systèmes à apprentissage supervisé car ils nécessitent le calcul préalable de l'ensemble du jeu d'indicateurs avant la prise de décision.

De telles considérations conduisent à la définition d'une structure de reconnaissance organisée par blocs. Ces blocs correspondent aux traitements appliqués aux formes d'onde. La Figure 19-1 présente la structure décisionnelle utilisée pour la classification des régimes permanents des perturbations. Les blocs d'indicateurs définis en appliquant cette règle y apparaissent clairement.

#### **Réduction du nombre d'indicateurs analysés par classe d'évènements**

La structure décisionnelle présentée à la Figure 19-1 n'est pas uniquement l'aboutissement de la règle exposée au paragraphe précédent. Cette règle prioritaire impose l'analyse par blocs des indicateurs.

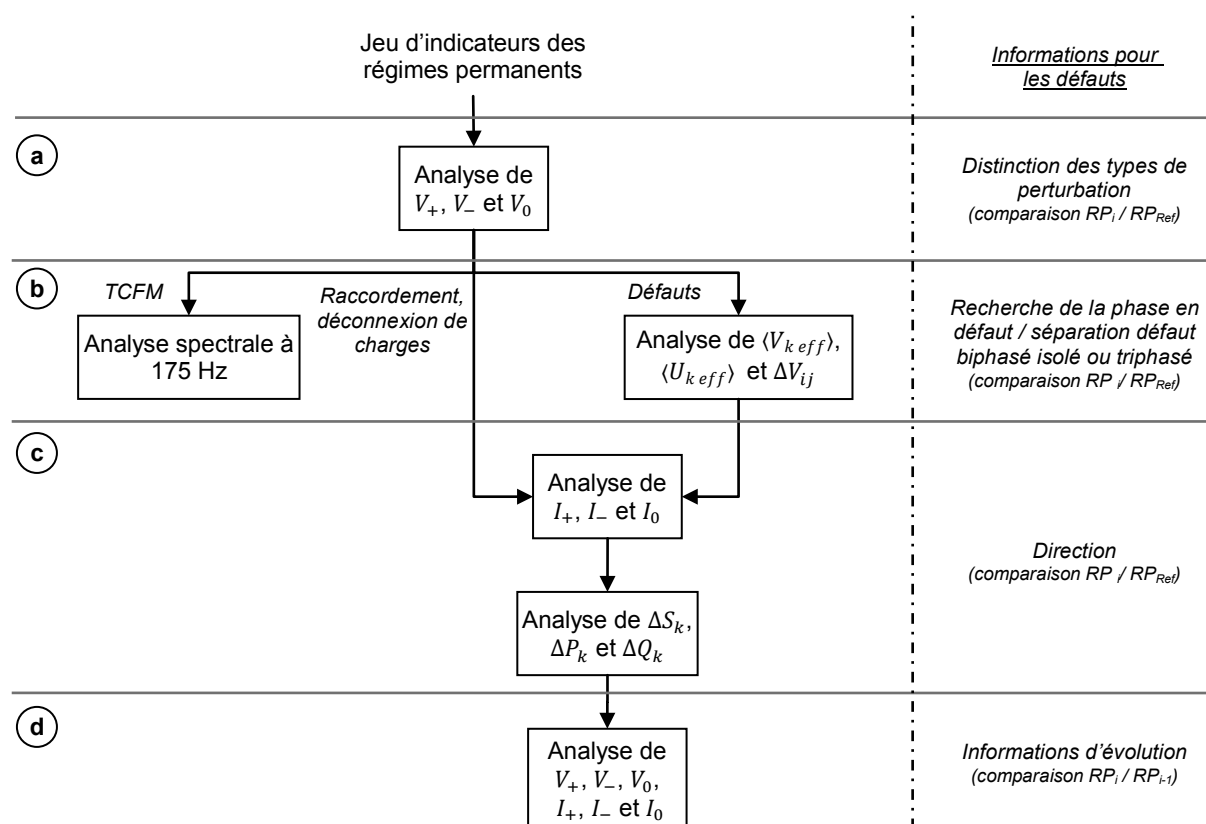
L'ordonnancement et le contenu de ces blocs sont, par contre, conditionnés par d'autres objectifs.

Chaque bloc d'analyse contient un ensemble d'indicateurs dont le pouvoir de discrimination dépend de la classe considérée. Afin de réduire le nombre de tests à réaliser, on cherche à éliminer, pour chaque classe de perturbations, les indicateurs qui sont peu discriminants ou qui offrent des informations redondantes. L'optimisation de la structure de décision passe donc par l'identification des modules de traitements qui ne sont pas requis pour discriminer certaines classes de perturbations.

La réduction du nombre de tests présente un double intérêt :

- ✓ Elle réduit le coût de l'analyse puisque moins de tests signifie moins d'opérations à réaliser.
- ✓ Elle améliore les performances de reconnaissance du système. La multiplication des tests pour une même classe de perturbations a tendance à réduire la capacité de reconnaissance d'un système. L'analyse redondante de certaines informations fournit une évaluation pessimiste de la vraisemblance de l'évènement.

On notera que l'objectif de réduction du nombre d'indicateurs analysés est directement lié à la problématique de leur ordonnancement. Une structure traitant en premier des indicateurs à fort pouvoir discriminant réduit de manière plus importante le nombre de tests à réaliser.



**Figure 19-1 – Architecture du système de reconnaissance des régimes permanents**

Les variations utilisées dans les parties (a), (b) et (c) de cette arborescence sont calculées par rapport au dernier régime permanent non perturbé. Celles calculées dans sa partie (d) sont calculées par rapport au régime permanent précédent

La réduction du nombre de tests entraîne d'importantes modifications dans la structure du système d'analyse des perturbations. Contrairement à la Figure 17-5, les étapes d'analyse ne sont plus toutes effectuées de manière séquentielle. Dans cette configuration, la validation du  $j^{\text{ème}}$  test d'une classe l'autorise à aller directement au  $k^{\text{ème}}$  module d'analyse sans effectuer les étapes intermédiaires.

Cette réduction n'impacte toutefois pas l'ordonnancement des étapes d'analyse, c'est-à-dire l'ordre dans lequel elles sont effectuées :

- ✓ Si les modules  $j+1$  à  $k-1$  ne sont pas testés pour la classe de perturbations  $i$  mais qu'ils sont nécessaires à la discrimination d'une ou plusieurs autres classes valides, le module de traitement de l'étape d'analyse  $k$  est mis en attente. Il ne peut être effectué avant que les tests  $j+1$  à  $k-1$  soient réalisés pour toutes les classes valides les analysant.
- ✓ Par contre, si ces indicateurs ne sont analysés par aucune classe valide, le processus passe directement à l'étape  $k$  sans effectuer les tests précédents.

### **Augmentation de la vitesse de discrimination**

L'optimisation de la structure de décision passe nécessairement par celle de l'ordonnancement des étapes d'analyse des indicateurs. Pour augmenter son efficacité, les indicateurs fournissant les informations les plus discriminantes, c'est-à-dire les indicateurs capables de restreindre de manière importante le nombre de classes de perturbations valides, sont identifiés.

Ces indicateurs sont analysés au cours des premières étapes de la structure de décision afin de réduire le plus rapidement possible le nombre de tests à réaliser. Les indicateurs plus « spécialisés » sont utilisés une fois qu'un maximum de classes a été éliminé.

Les indicateurs les plus discriminants ainsi que ceux proposant des informations redondantes sont identifiés lors de la phase de dépouillement et d'analyse des indicateurs issus des simulations. Ces points sont abordés dans les paragraphes suivants.

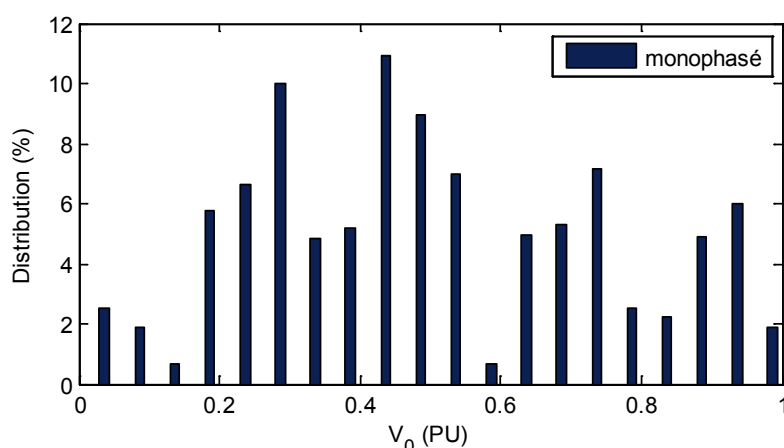
### **Remarque 9 : Estimation de la vraisemblance de certaines informations intermédiaires**

On notera que la structure d'analyse proposée à la Figure 19-1 a l'avantage de séparer différents types d'informations. En cas d'identification réussie, on peut estimer la vraisemblance de chaque information à partir des vraisemblances locales. Par exemple, pour les classes de perturbations de type « défaut », la synthèse des vraisemblances locales des tests des parties  $a$  et  $b$  fournit la vraisemblance du type de défaut, celle de la partie  $c$  détermine la vraisemblance de l'information de direction tandis que celle de la partie  $d$  traite de son évolution.

Cette distinction n'est par contre pas aussi nette pour la structure de décision utilisée pour discriminer les régimes transitoires des perturbations (Figure 19-4). Les perturbations transitoires qu'elle analyse sont de natures très différentes et les critères analysés ne fournissent pas les mêmes informations pour les différentes classes. En raison de l'absence de base commune, la concaténation des vraisemblances locales dépend du type de perturbations analysées.

### 19.1.2. Définition des critères de reconnaissance

Les systèmes experts analysant les régimes transitoires et permanents des perturbations traitent un grand nombre d'indicateurs. Les critères qu'ils leur appliquent sont déterminés à partir des valeurs des indicateurs obtenues lors du traitement des simulations paramétriques présentées au chapitre précédent. L'examen de cette base de données fournit des histogrammes illustrant la répartition des valeurs de chaque indicateur pour les différentes classes de perturbations (Figure 19-2). Ces histogrammes sont utilisés pour déterminer les valeurs des critères, identifier les indicateurs les plus discriminants ou identifier les redondances d'informations.



**Figure 19-2 – Répartition des valeurs de la tension homopolaire en présence de défauts monophasés en aval du jeu de barres pour différentes configurations d'un réseau impédant**

La définition des critères de reconnaissance pour chaque classe d'évènements, leur ordonnancement et l'établissement de la structure du système sont réalisés en tenant compte des contraintes que nous nous sommes imposées au paragraphe précédent. Le raisonnement utilisé pour y aboutir est détaillé dans les deux paragraphes suivants.

On rappelle que les histogrammes utilisés ne témoignent pas de la distribution statistique des caractéristiques des perturbations observées sur le réseau. Ils représentent uniquement la répartition des valeurs des indicateurs pour les simulations des réseaux-types réalisées. En effet, pour notre application, la distribution statistique des évènements joue un rôle mineur puisque l'on veut que les critères de reconnaissance soient valables pour tous les évènements recherchés indépendamment de leur fréquence d'apparition sur le réseau.

### **Analyse indépendante d'un indicateur**

Au cours de cette étape, les histogrammes de répartition des indicateurs de chaque classe (Figure 19-2) sont analysés de manière indépendante. Ils permettent d'approximer le domaine de variations de chaque indicateur pour chaque classe de perturbations et fournissent une première estimation des bornes minimales et maximales de chaque indicateur.

### **Analyse croisée d'un indicateur**

Chaque indicateur est ensuite analysé de manière croisée. Sa plage de variations pour une classe d'événements donnée est comparée avec celles observées pour les autres classes d'événements (Figure 19-3). Un seul indicateur étant insuffisamment discriminant pour dissocier l'ensemble des types de perturbations, on utilise cette analyse croisée pour :

- ✓ *Mettre en évidence les classes de perturbations pouvant être séparées par chaque indicateur*

Ex : L'analyse de la tension homopolaire sépare les défauts à la terre des autres classes de perturbations

- ✓ *Déterminer les classes de perturbations recouvrantes, c'est-à-dire les classes dont l'intersection des plages de variations des indicateurs est non-nulle.*

Ex : L'analyse de la tension homopolaire ne permet pas de distinguer les défauts à la terre dont la source est en aval de ceux pour lesquels elle est en amont.

- ✓ *Identifier le type des fonctions de vraisemblance*

En analysant de manière croisée les différentes classes, on identifie le type des fonctions de vraisemblance appropriées à chaque classe de perturbations – pentes descendante ou montante (Figure 17-4-a), forme trapézoïdale (Figure 17-4-b)...

- ✓ *Affiner le comportement des fonctions de vraisemblance*

Les bornes des intervalles de variations sont ajustées afin de prendre en compte les séparations nettes apparaissant entre plusieurs classes de perturbations. Dans ces conditions, les intervalles de vraisemblance maximale peuvent être élargis de manière à améliorer la fiabilité de la reconnaissance.

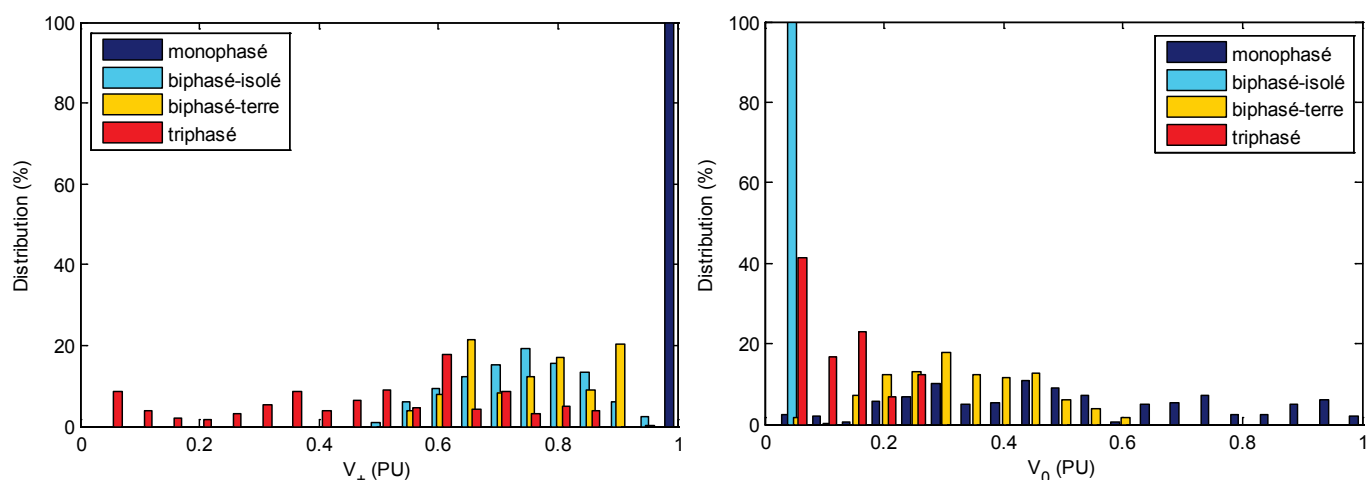
Ex : La borne supérieure de l'intervalle de variation des courants de défauts bi- et triphasés peut être augmentée afin de tenir compte de puissances de court-circuit plus élevées que celles utilisées lors des simulations paramétriques.

La largeur des zones de transition des critères est également déterminée à partir de l'analyse croisée des classes d'événements. Elle permet de fixer le taux de recouvrement autorisé entre les différentes classes.

D'autres facteurs, tels que les incertitudes sur les valeurs des indicateurs introduites lors de leur calcul, sont aussi pris en compte lors de sa définition. Ces incertitudes ont principalement trois

causes : les perturbations permanentes de type harmoniques et bruit, les erreurs sur la détection des instants d'apparition des phases caractéristiques des perturbations (Chapitre 15), ainsi que la non-prise en compte des transitoires proches telles que ceux des défauts monophasés auto-extincteurs et réamorçants affectant les réseaux compensés (Chapitre 10).

La Figure 19-3 représente les plages de variation des indicateurs portant sur les tensions homopolaire et directe pour différentes catégories de défauts (défauts monophasés, bi-terres, bi-isolés et triphasés) localisées en aval du point de mesure sur un réseau à neutre impédant.



**Figure 19-3 – Répartition des valeurs des tensions directes et homopolaires en présence de différentes classes de défauts pour différentes configurations d'un réseau impédant**

(extrait de la base de données simulées)

### 19.1.3. Définition de la structure de reconnaissance

A l'issue de l'étape précédente, les critères de reconnaissance de chaque classe de perturbations sont fixés et les classes discriminées par chaque indicateur sont identifiées. Jusqu'à présent, les problématiques de redondance et d'ordonnement des modules d'analyse des indicateurs n'ont pas été considérées. On se trouve donc avec une structure telle que celle présentée à la Figure 17-5. La prise en compte des problématiques précédentes va permettre d'optimiser l'efficacité de la structure de décision des systèmes experts.

#### Identification et élimination des redondances

La connaissance des classes discriminées par chaque indicateur est une information particulièrement utile pour identifier les redondances d'informations. Celles-ci ne sont pas toujours immédiates, c'est-à-dire que la comparaison deux-à-deux de la capacité de discrimination de chaque indicateur ne suffit pas à les mettre en évidence. De nombreuses redondances apparaissent lorsque des combinaisons d'indicateurs sont considérées.

Par exemple, pour l'identification des événements permanents, l'analyse des courants de ligne n'apporte pas d'informations supplémentaires, si les tensions simples et les composantes symétriques du système des tensions et des courants sont analysées. Cette caractéristique explique que ces indicateurs n'apparaissent pas dans le schéma de décision présenté à la Figure 19-1 alors qu'ils ont été calculés lors de la constitution de la base de reconnaissance.

On notera que ces informations sur les courants sont exploitées par les différents classifieurs SVM. Leur démarche de classification ne nécessite pas de réaliser l'optimisation des jeux d'indicateurs. L'ensemble du processus de discrimination est géré en interne par le biais de leurs hyperparamètres.

D'autres redondances plus locales sont également mises en évidence. Elles conduisent à ne pas utiliser certains indicateurs pour des classes d'événements particulières. Par exemple, pour les régimes permanents des défauts monophasés, l'analyse de leur courant inverse n'apporte aucune information supplémentaire si les composantes symétriques des tensions et les composantes homopolaire et directe des courants sont analysées.

### **Ordonnancement des modules d'analyse des indicateurs**

Dans les deux exemples précédents, on notera que les indicateurs éliminés de la phase d'analyse le sont sous des conditions bien définies : l'examen préalable d'un ensemble d'autres indicateurs. Ces conditions mettent en évidence le lien étroit entre le choix des modules d'analyse à conserver pour chaque classe de perturbations et leur ordonnancement. En effet, des indicateurs différents sont éliminés selon l'ordonnancement choisi.

Afin d'optimiser la vitesse du système de décision, les indicateurs les plus discriminants sont traités au cours des premières étapes. Pour les systèmes destinés à la reconnaissance des régimes permanents, les indicateurs analysant les composantes directe et homopolaire des tensions ou ceux recherchant la présence de composantes fréquentielles à 175 Hz sont ainsi analysés en premier.

On note que l'indicateur analysant la composante inverse de la tension est également étudié au cours de la première étape bien que cet indicateur soit moins discriminant. Cet ordonnancement est lié à la structure par blocs du système qui est imposée par la limitation de son coût calculatoire.

Les indicateurs plus spécialisés sont traités dans un second temps afin d'affiner la reconnaissance de la perturbation. Par exemple, les indicateurs analysant la composante homopolaire des courants sont essentiels pour déterminer la position relative des défauts à la terre, mais étant peu discriminants pour les autres catégories de perturbations, ils sont analysés plus tard.

Parmi l'ensemble des indicateurs caractérisant les perturbations, un certain nombre a un pouvoir discriminant équivalent. Ces indicateurs ont été ordonnancés en fonction de la fréquence des événements électrotechniques qu'ils discriminent afin d'augmenter la vitesse d'identification de ce type de perturbations. Par exemple, les défauts monophasés apparaissent plus fréquemment sur le

réseau HTA que les défauts bi- et triphasés : ils représentent plus de 60% des défauts quel que soit le régime de neutre du réseau [EDF94a]. Afin de tenir compte de cette particularité, cette catégorie de défauts est privilégiée dans l'ordonnement des modules d'analyse des indicateurs.

La Figure 19-4 représente la structure du système de reconnaissance expert utilisée pour discriminer les perturbations transitoires. Elle a été obtenue en appliquant les règles et raisonnements présentés dans les paragraphes précédents.

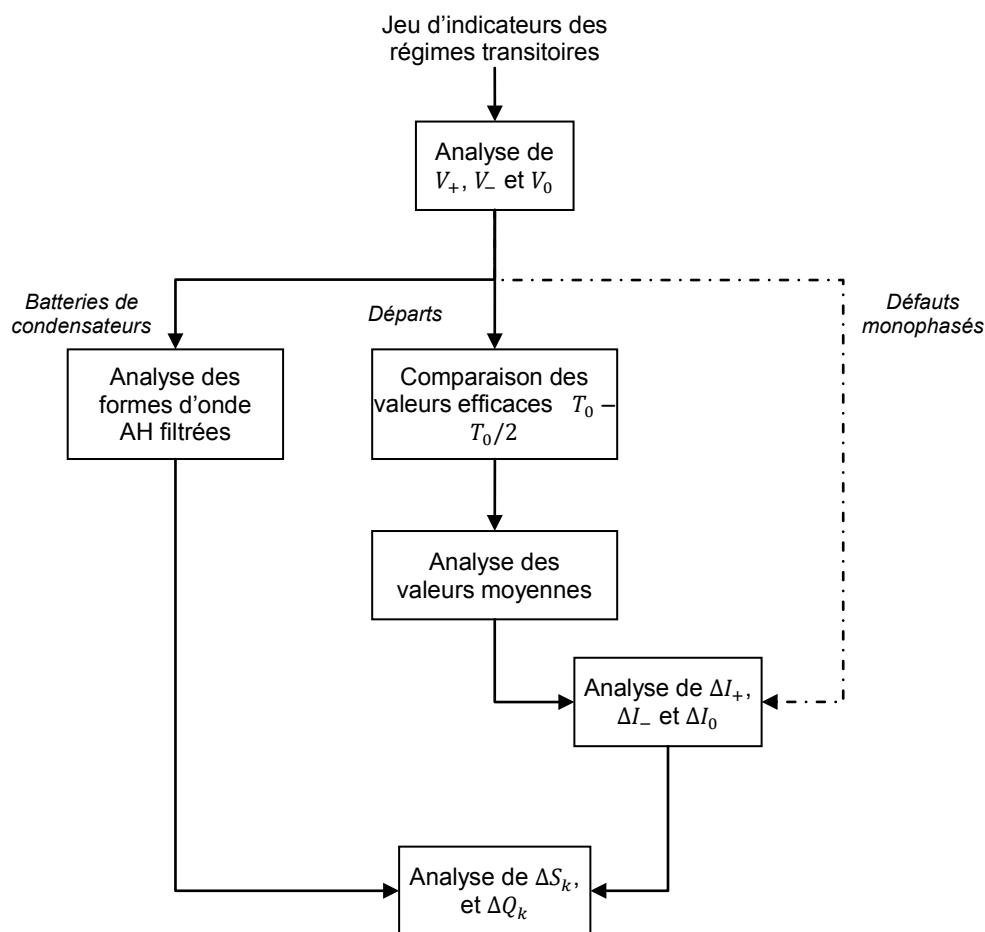


Figure 19-4 – Architecture du 1<sup>er</sup> niveau de reconnaissance des régimes transitoires

### 19.1.4. Impact des cas d'utilisation

La discrimination des événements électrotechniques survenant sur les réseaux HTA a abouti à la définition de deux structures de décision expert distinctes, une par régime de fonctionnement des perturbations. Pour ces deux structures, plusieurs cas d'utilisation sont distingués. Ils sont fonction :

- ✓ du régime de neutre – impédant ou compensé – du réseau,
- ✓ de la position du point de mesure sur le réseau. On rappelle que, dans cette thèse, seuls les points de mesure situés au niveau du jeu de barres du poste source ou au niveau du primaire d'un poste HTA/BT sont considérés.



Ces cas d'utilisation impactent les signatures de certaines perturbations. Le comportement d'un défaut monophasé sur un réseau compensé est, par exemple, très différent de celui observé sur un réseau impédant. La signature des enclenchements de départs est par contre peu affectée par un changement de régime de neutre.

Les jeux de critères appliqués aux structures de décision analysant les régimes permanents (Figure 19-1) et transitoires (Figure 19-4) sont adaptés selon le cas d'utilisation. Quatre jeux de critères (ou gabarits) distincts sont définis pour chaque régime de fonctionnement des perturbations.

On note que les structures de reconnaissance présentées à la Figure 19-1 et à la Figure 19-4 sont indépendantes des cas d'utilisation. Leur impact se limite au nombre de perturbations considérées lors de la phase de discrimination. Par exemple, lors de l'analyse des régimes transitoires observés sur les réseaux à neutre impédant, les critères et la partie de la structure de discrimination dédiée aux défauts monophasés ne sont pas activés (Figure 19-4).

### **19.1.5. Evaluation et analyse des performances**

#### **19.1.5.1. Estimation des performances des systèmes experts**

La base d'événements simulés à l'aide du logiciel EMTP-RV est utilisée pour évaluer les performances des systèmes de décision experts mis au point au cours des paragraphes précédents. Le Tableau 6 résume les résultats du processus d'identification obtenus par les structures décisionnelles définies pour les régimes permanents et transitoires. Les deux types de régimes de neutre sont distingués. Les valeurs obtenues reflètent la moyenne des statistiques de reconnaissance définies au Chapitre 16. Elles sont déterminées pour les deux positions de points de mesure considérées et pour les différentes classes de perturbations envisagées lors des régimes de fonctionnement analysés (§17.2).

Ce tableau reflète la capacité du procédé d'identification à reconnaître les événements transitoires et permanents sur les deux types de régimes, indépendamment de la position relative de la source de la perturbation par rapport au point d'observation sur le réseau de distribution.

On note que certaines caractéristiques des défauts contenus dans la base d'apprentissage sont restreintes. Ces simplifications ont facilité la mise au point de la méthode de commande des simulations des perturbations, mais ont réduit le champ de perturbations couvert. Par exemple, pour les défauts monophasés survenant sur les réseaux à neutre compensé, des défauts de types auto-extincteurs ou réamorçants n'ont pas été simulés au cours de l'analyse paramétrique. La base contient uniquement des perturbations « classiques », c'est-à-dire des perturbations pouvant être décomposées en régimes de fonctionnement transitoires et permanents successifs. De même des perturbations évolutives, telles que l'évolution d'un défaut monophasé en défaut biphasé-terre ou l'évolution de la résistance de défaut d'un défaut monophasé, n'ont pas été simulées.

La non-prise en compte de ces deux derniers types de perturbations exerce un impact limité sur les caractéristiques conservées dans la base de données, car les indicateurs de reconnaissance utilisés pour leur caractérisation y sont peu sensibles. Par contre, en restreignant la simulation des défauts monophasés affectant les réseaux compensés aux seules perturbations permanentes, on limite les domaines explorés par les jeux d'indicateurs. La capacité de détection des classifieurs mis au point à partir de ces données sera donc nécessairement affectée en présence de tels événements.

Régime de fonctionnement	Régime de neutre	Erreurs de classification (en %)	Fausse identifications (en %)	Non-identification (en %)
Régime permanent	Neutre compensé	0.03	<0.001	0.06
	Neutre impédant	0.03	<0.001	0.04
Régime transitoire	Neutre compensé	0.06	0.19	0.07
	Neutre impédant	0.02	0.25	0.04

**Tableau 6 – Performances des systèmes de reconnaissance experts définis pour les régimes permanents et transitoires pour les deux régimes de neutre**

#### 19.1.5.2. Analyse des performances

Les résultats de la reconnaissance fournis par le Tableau 6 confirment la bonne séparabilité des classes de perturbations considérées. Cette efficacité est essentiellement liée aux jeux d'indicateurs transitoires et permanents utilisés : les faibles taux d'erreurs de classification et de non-identifications assurent la bonne discrimination des perturbations en régimes permanents et transitoires.

L'analyse détaillée des performances obtenues pour chaque classe de perturbations montre que seules quelques classes présentent des performances de discrimination inférieures. Quelle que soit leur position par rapport au point de mesure, les défauts monophasés et biphasés à la terre concentrent les problèmes. Lorsque ces défauts sont résistants ( $>500\Omega$ ), les défauts monophasés peuvent ne pas être identifiés (non-identification) tandis que les défauts biphasés-terre peuvent être classés comme isolés (erreur d'identification). Ces erreurs ont pour origine le faible impact de ces événements sur des grandeurs caractéristiques comme la tension homopolaire. Comme ils induisent peu de variations sur les indicateurs de reconnaissance, leurs valeurs se retrouvent dans les zones de transition de plusieurs critères. La vraisemblance globale des événements est ainsi progressivement réduite. Les performances d'identification de ces classes de perturbations pourraient être quelque peu améliorées en utilisant des fonctions de vraisemblance dont les zones de transitions sont plus « douces » que les simples fonctions linéaires par morceaux actuellement utilisées par le système de décision [DAS00].

Pour les perturbations transitoires causées par des enclenchements, les indicateurs et les critères utilisés sont suffisamment performants pour les discriminer de manière efficace. Lorsque les classes de transitoires correspondant aux transitoires d'apparition et d'extinction des défauts monophasés survenant sur les réseaux compensés sont considérées, on observe une faible dégradation des performances de reconnaissance des perturbations. Cette réduction est essentiellement liée au moins bon comportement du classifieur en présence de défauts monophasés fortement résistants.

Cette première étape a permis de vérifier la capacité des systèmes experts à discriminer les classes de perturbations électrotechniques considérées dans la base d'apprentissage. L'analyse de cette base de perturbations ne permet toutefois pas d'attester des performances d'identification des systèmes experts dans des conditions réelles. La présence de perturbations harmoniques, de transitoires proches ou encore de fausses segmentations ne sont en effet pas reproductibles par simulation de manière réaliste (fausses identifications). Les carences de la base de données ne permettent pas non plus de vérifier le comportement du système d'identification en présence de perturbations évolutives ou de défauts monophasés auto-extincteurs et réamorçants affectant les réseaux à neutre compensé.

### 19.2. Recherche des classifieurs SVM optimaux

Les classifieurs SVM réalisent l'apprentissage du modèle des données à partir des indicateurs de la base d'événements simulés qui ont été déterminés par simulations paramétriques pour chaque classe de perturbations. Leurs performances sont conditionnées par plusieurs éléments.

- ✓ La constitution d'une base d'apprentissage équilibrée est requise. La représentation des différentes classes, leur répartition et leur représentativité des perturbations réelles conditionnent l'efficacité de la classification [CEL09].
- ✓ Les hyperparamètres de la SVM influencent également ses performances (Annexe D). La valeur du coefficient  $C$  contrôle le compromis entre la largeur de la marge et le nombre d'erreurs de classement tolérées. Pour le noyau gaussien sélectionné  $K(x,y)$ , sa variance  $\sigma$  impacte la capacité de séparation des classes de perturbations du classifieur.

#### 19.2.1. Traitement de la base de données

Pour limiter l'influence des erreurs d'apprentissage liées à la base de données, un soin tout particulier a été apporté lors de sa création pour que les différentes classes d'événements soient équilibrées. Seules les classes correspondant aux « événements non-considérés » ne se conforment pas à ce critère. Ce constat est vérifié en particulier pour l'analyse des régimes transitoires. La classe regroupe alors les éléments de 25 classes de perturbations (§17.2). L'influence de ce déséquilibre est évaluée

au paragraphe 19.2.4. Les performances des classifieurs SVM sont déterminées soit en tenant compte de la totalité de la base des données appartenant à cette classe, soit en la sous-échantillonnant. Ce sous-échantillonnage est fait de telle sorte que la répartition des échantillons de chaque classe composant la classe « évènements non-considérés » est conservée et que le nombre total de ses échantillons soit équivalent à celui des autres classes de perturbations.

## 19.2.2. Optimisation des performances du classifieur SVM

### Hyper-paramètres du classifieur

Les performances de séparation des classifieurs SVM dépendent de leurs hyperparamètres  $C$  et  $\sigma$  (Annexe D). Il est difficile de les déterminer directement, car aucune information ne permet de les évaluer *a priori*. Cette absence d'information n'est toutefois pas rédhibitoire car les valeurs optimales de ces deux hyperparamètres peuvent être recherchées en parcourant une grille  $G$  à maillage logarithmique régulier. Le maillage utilisé dans ce manuscrit prend la forme suivante :

$$G = \{C, \sigma\} = \{[2^{-5}, 2^{-3}, \dots, 2^{15}] \times [2^{-3}, 2^{-1}, \dots, 2^{15}]\} \quad (19-1)$$

Plusieurs publications montrent que cette approche présente, en termes de temps et de coûts calculatoires, des performances équivalentes à des méthodes plus complexes [GUE07]. Cette caractéristique tient essentiellement au fait que les performances du classifieur sont peu sensibles aux faibles variations de ces hyperparamètres. Cette propriété est à l'origine de l'échelonnement des valeurs de la grille utilisée.

### Evaluation du classifieur par validation-croisée

Quel que soit le type de classifieur utilisé, si on l'entraînait et qu'on estimait ses performances à partir d'un même ensemble d'échantillons, on obtiendrait des évaluations beaucoup trop optimistes [CEL09]. Dans ces conditions, les erreurs de classification seraient biaisées, car l'algorithme serait devenu spécialiste de l'ensemble d'entraînement. Il serait également impossible d'évaluer sa capacité de généralisation, c'est-à-dire sa capacité à classer correctement des données non-comprises dans la base d'apprentissage.

Afin d'évaluer et de comparer les différents classifieurs testés, on utilise une méthode de validation-croisée. Cette méthode d'analyse statistique procède en trois phases : elle découpe la base de données d'évènements en  $k$  parties équivalentes, en utilise  $k-1$  pour l'apprentissage du modèle des données et estime ses performances avec la partie restante. Cette dernière partie joue le rôle de nouvelles données-tests et permet d'évaluer la capacité de généralisation du classifieur. Les étapes d'apprentissage et de test sont répétées  $k$  fois, de sorte que chaque partie issue du découpage est utilisée une fois comme base d'évaluation. Le procédé de validation-croisée fournit ainsi  $k$  évaluations des performances  $\tau_{\text{erreur}}\{i, C, \sigma\}$  du classifieur pour un jeu  $\{C, \sigma\}$  d'hyperparamètres donné [REF09].

La capacité de généralisation du classifieur analysé  $\tau_{erreur\{C,\sigma\}}$  est déterminée en moyennant les taux d'erreurs de classification obtenus à chaque itération (19-2).

$$\tau_{erreur\{C,\sigma\}} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \tau_{erreur\{i,C,\sigma\}} \quad (19-2)$$

Le procédé de validation-croisée portant sur  $k$  partitions équivalentes de l'ensemble d'apprentissage est désigné dans ce manuscrit par le terme Anglais de « *k-fold cross-validation* ». La Figure 19-5 illustre le principe de cette méthode sur un exemple tripartite.

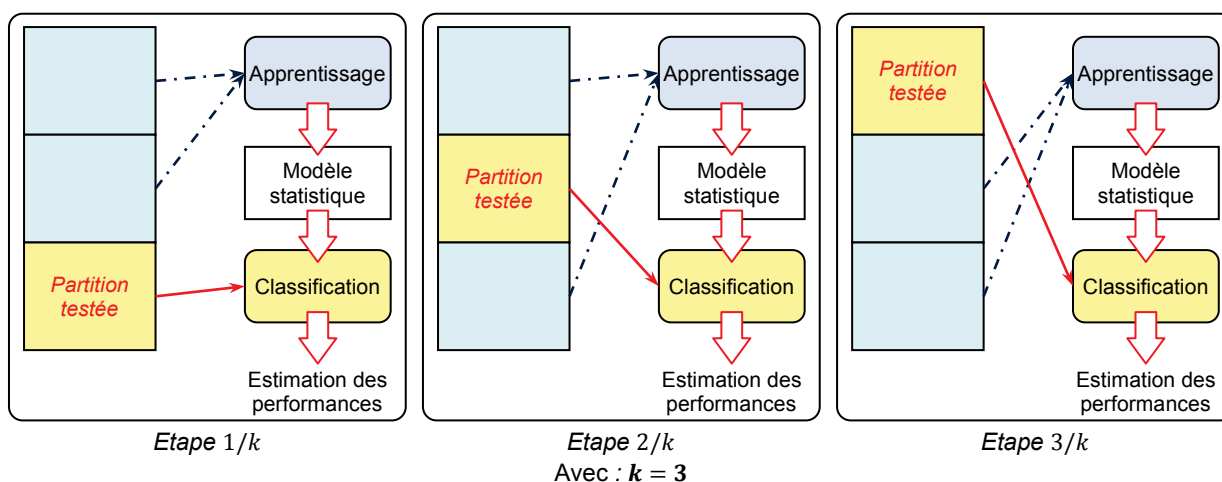


Figure 19-5 – Schéma explicatif d'une 3-fold cross-validation

### Méthode d'optimisation des performances du classifieur SVM

Afin de déterminer le classifieur SVM optimum, c'est-à-dire celui pour lequel le jeu d'hyperparamètres  $C$  et  $\sigma$  fournit la capacité de généralisation la plus élevée, on évalue chaque classifieur par validation-croisée (*10-fold cross-validation*) : pour chaque point de la grille d'évaluation  $G$ , ses performances de classification  $\tau_{erreur\{C,\sigma\}}$  sont estimées.

Le schéma complet du processus d'estimation est présenté à la Figure 19-6. Il est composé de deux boucles imbriquées : la boucle interne estime les performances de chaque classifieur par validation-croisée tandis que la boucle externe fait parcourir à ses hyperparamètres l'ensemble de la grille d'analyse  $G$ .

La réalisation de ce schéma d'évaluation des classifieurs SVM fournit une carte de leurs performances en fonction de leurs deux hyperparamètres  $C$  et  $\sigma$  (Figure 19-7). Cette carte permet de déterminer très simplement le meilleur classifieur : on choisit celui dont l'erreur de généralisation est la plus faible en moyenne sur les  $k$  évaluations. Ce sont ses vecteurs supports et hyperparamètres qui sont utilisés pour classifier les nouvelles données lors de la phase d'analyse.

On rappelle que le processus d'optimisation des performances est réalisé pour deux jeux de données : le jeu complet et celui pour lequel la classe des « événements non-considérés » est sous-échantillonnée (cf. §19.2.1).

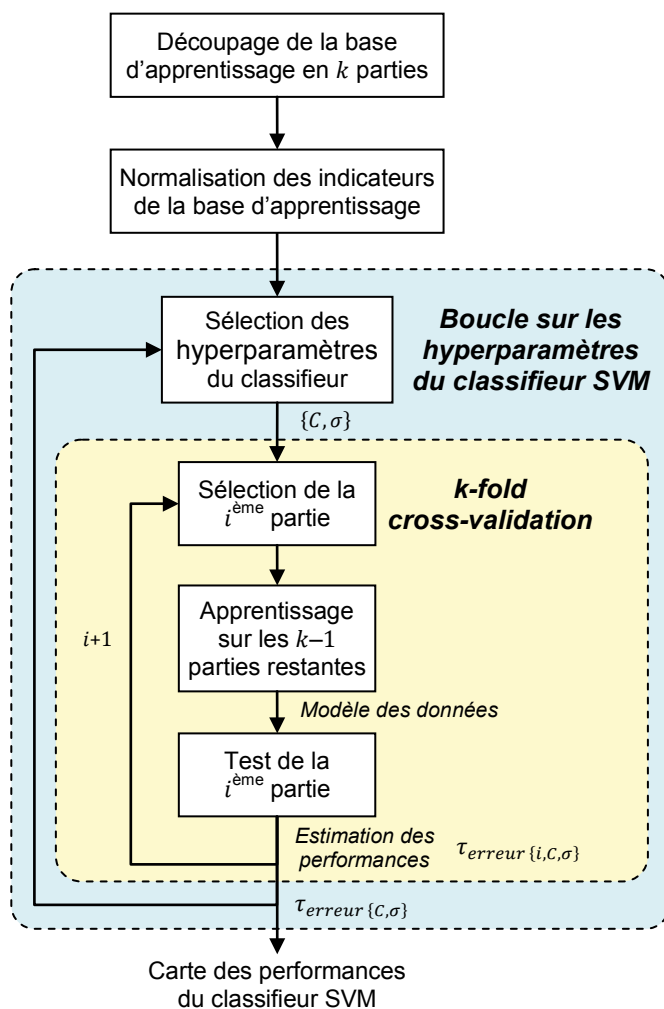


Figure 19-6 – Schéma d'évaluation des performances des classifieurs SVM par validation-croisée

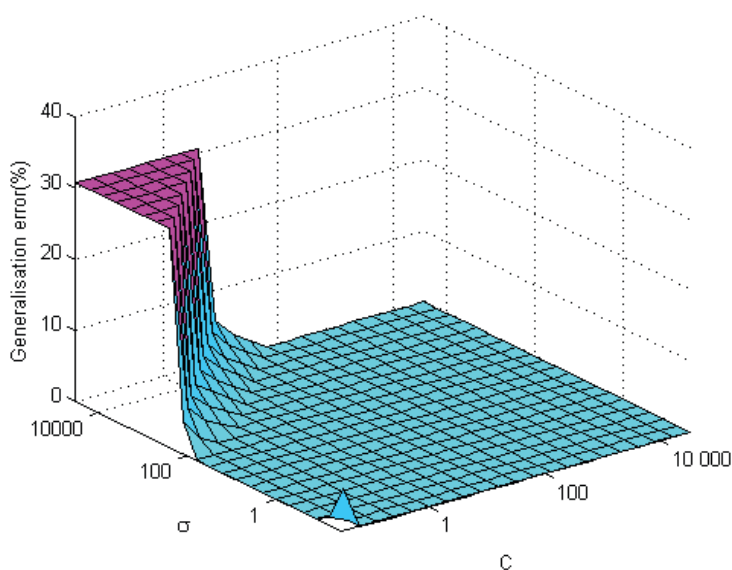


Figure 19-7 – Exemple de carte de performance d'un classifieur SVM  
(événements : défauts biphasés terre / défauts biphasés isolés en aval du point de mesure localisé au jeu de barres du poste source)

### **Type de classifieurs SVM utilisés**

A l'origine, les classifieurs SVM ont été développés pour des problèmes de discrimination de données bi-classes [REF09]. En Annexe D, plusieurs variantes permettant leur extension aux problèmes multi-classes sont présentées. La méthode « un-contre-un » est utilisée dans ce manuscrit et appliquée pour discriminer les perturbations électrotechniques.

Au vu des performances du système expert, on privilégie cette méthode à l'approche « un-contre-tous » et aux autres classifieurs multi-classes (§D.4). Elle présente en effet des performances équivalentes voire supérieures dans les problèmes de discrimination pour lesquels les classes sont facilement séparables [GUE07]. Les indicateurs utilisés pour caractériser les perturbations étant définis de sorte à maximiser cette propriété, l'utilisation de cette méthode nous a paru naturelle.

L'approche « un-contre-un » a l'avantage de requérir moins d'espace mémoire lors de la phase d'apprentissage puisque toutes les classes sont comparées deux par deux.  $N(N-1)/2$  classifieurs sont entraînés sur des ensembles de données plus faibles, où  $N$  est le nombre de classes du problème. Le résultat de la discrimination est déterminé par un système de vote majoritaire tenant compte du résultat fourni par chaque classifieur. La classe rassemblant le plus de votes est considérée comme représentative de la perturbation analysée [GUE07].

Sa démarche d'optimisation est aussi plus aisée. Au lieu d'optimiser le classifieur de manière conjointe pour  $N$  classes de perturbations, on optimise séparément  $N(N-1)/2$  classifieurs [HAS98]. De plus, l'utilisation de classifieurs binaires lui confère une plus grande souplesse. Par exemple, si une classe d'événements supplémentaire devait être discriminée à partir des mêmes jeux d'indicateurs, les classifieurs binaires initiaux seraient conservés. Il conviendrait juste d'entraîner et d'optimiser  $N+1$  nouveaux classifieurs binaires.

Cette méthode est également privilégiée par rapport aux variantes multi-classes des SVM car son implémentation la rend apte à traiter un plus grand volume de données. Sa complexité algorithmique est en effet inférieure à celle des autres types de classifieurs SVM multi-classes alors que leurs performances sont équivalentes [GUE07].

### **19.2.3. Impact des cas d'utilisation**

Comme les régimes transitoires et permanents des événements électrotechniques sont caractérisés par des jeux d'indicateurs distincts, plusieurs systèmes de décision SVM sont requis pour les discriminer. Pour les systèmes de décision experts, deux structures différentes sont définies pour les exploiter : une par régime de fonctionnement. Pour les systèmes SVM, cette distinction apparaît différemment : les classes d'indicateurs considérées lors des phases d'apprentissage et de classification diffèrent en type et en nombre (Tableau 4).

Les classes d'évènements traitées par les systèmes ne dépendent pas seulement du type de régime de fonctionnement considéré. Plusieurs cas d'utilisation sont distingués pour chacun d'eux. En plus du régime de fonctionnement, ils dépendent du régime de neutre du réseau (impédant ou compensé) et de la position du point de mesure sur le réseau (jeu de barres du poste source ou primaire du poste HTA/BT d'un client).

Ces cas d'utilisation impactent les signatures de certaines perturbations ainsi que le nombre de classes de perturbations à discriminer. Par exemple, le type de régime de neutre impacte fortement le comportement des défauts monophasés, mais influence peu la signature des enclenchements de départ. Il conditionne également le nombre de classes de perturbations à considérer lors de l'analyse des régimes transitoires des perturbations : 5 classes sont analysées sur les réseaux impédants et 7 classes sur les réseaux compensés (§17.2).

Ces spécificités nécessitent l'utilisation de bases d'apprentissage différentes pour chaque cas. Un classifieur SVM est donc défini pour chacun des cas d'utilisation identifié. Au total, huit types de classifieurs distincts sont entraînés et testés, quatre par type de régimes de fonctionnement.

On notera que certains classifieurs binaires des huit classifieurs définis pour les différents cas d'utilisation sont proches et n'auraient pas nécessité de réapprentissage. Ceci s'explique par le fait que la signature de certains évènements est invariante pour plusieurs cas d'utilisation. Dans ces conditions, les bases d'apprentissage utilisées pour mettre au point les modèles de ces classes d'évènements sont très proches. Par exemple, plusieurs classifieurs binaires discriminant les régimes transitoires des réseaux impédants sont similaires à ceux utilisés pour les réseaux compensés, car les signatures des enclenchements de batteries de condensateurs et des enclenchements de départs ne sont pas affectées par le type de régime de neutre.

### **19.2.4. Evaluation et analyse des performances**

#### **19.2.4.1. Estimation des performances des classifieurs SVM**

On rappelle que les classifieurs SVM traités dans ce manuscrit utilisent tous une approche « un-contre-un ». Pour évaluer l'influence de la base de données sur leur capacité de généralisation, deux variantes sont testées pour chacun des huit classifieurs. La première utilise la base d'apprentissage complète tandis que la seconde sous-échantillonne la classe des évènements non-considérés (cf. § 19.2.1). Les valeurs optimales des hyperparamètres du classifieur et l'erreur de généralisation correspondante sont déterminées pour chacune d'elles.

Les résultats de la classification des évènements électrotechniques contenus dans la base d'apprentissage sont résumés dans le Tableau 7. Une seule situation est ici considérée : elle correspond au cas, où les régimes transitoires et permanents des perturbations sont analysés à partir d'un point de mesure situé au jeu de barres d'un poste source alimentant un réseau HTA compensé.



Régime de fonctionnement	Base de données	Erreurs de classification (en %)	Fausse identification (en %)	Non-identification (en %)
Régime permanent	Complète	0.02	<0.001	0.04
	Classes « Evènements non-considérés » sous-échantillonnées	0.02	<0.001	0.03
Régime transitoire	Complète	0.04	0.14	0.19
	Classes « Evènements non-considérés » sous-échantillonnées	0.01	0.05	0.03

**Tableau 7 – Performances des systèmes de reconnaissance SVM définis pour les régimes permanents et transitoires**  
(régime de neutre : compensé ; point de mesure : jeu de barres du poste source)

#### 19.2.4.2. Analyse des performances

Les classifieurs SVM déterminés à l'issue du processus de validation-croisée réalisé à partir des perturbations simulées présentent de faibles taux d'erreurs de classification et de non-identification. Ces performances confirment la bonne séparabilité des perturbations simulées par les indicateurs de reconnaissance mis en œuvre. Cette séparabilité avait déjà été constatée au paragraphe 19.1.5.2 lors de l'évaluation des systèmes experts. La Figure 19-7 met en évidence cette caractéristique au travers de la grande stabilité de la capacité de généralisation du classifieur binaire considéré.

L'analyse détaillée des résultats obtenus pour les différentes classes de perturbations montre que les performances des classifieurs SVM sont quelque peu en retrait pour les défauts monophasés résistants. Ces performances sont toutefois supérieures à celles délivrées par le système expert dans la même situation. Ces erreurs semblent être causées par les échantillons correspondant aux valeurs des jeux d'indicateurs déterminées en présence de fausses segmentations qui sont inclus dans la classe non-événements. Elles ont deux origines : la faiblesse des variations induites par ces événements et un déséquilibre au sein de la classe « non-événements ». Les échantillons correspondant aux classes de perturbations non considérées pour le régime de fonctionnement étudié y surpassent largement en nombre les échantillons intégrés à la base pour la désensibiliser à la présence de fausses segmentations. Les performances de discrimination devraient pouvoir être améliorées en augmentant le nombre de représentants de cette dernière classe.

On observe également que le sous-échantillonnage de la classe des événements non-considérés a un impact positif sur l'erreur de généralisation, en particulier pour la classification des régimes transitoires des perturbations. La limitation du nombre d'événements appartenant à cette classe contribue au rééquilibrage du procédé de discrimination.

Les résultats présentés au Tableau 7 sont obtenus pour un seul cas d'utilisation : les défauts observés sur un réseau compensé à partir d'un point d'observation localisé au niveau du jeu de barres du poste source. Des performances similaires sont obtenues pour les autres cas d'utilisation, moyennant la réalisation d'un processus de validation-croisée qui leur est propre. On notera que certains des classifieurs binaires obtenus pour les différents cas d'utilisation sont proches. En utilisant pour ces classifieurs un unique jeu d'hyperparamètres par type de régime de fonctionnement et par localisation du point de mesure, les performances de reconnaissance ne seraient que peu dégradées.

Comme pour les systèmes experts, les résultats obtenus ici ne renseignent pas sur la robustesse du système dans des conditions réelles. Les bases d'apprentissage et de test des classes de perturbations utilisées par le classifieur SVM ne contiennent qu'un nombre limité d'échantillons correspondant au comportement des jeux d'indicateurs en présence de fausses segmentations. Leur comportement en présence de perturbations harmoniques, de fausses segmentations ou de transitoires proches est difficile à évaluer puisqu'ils sont non reproductibles par simulation (fausses identifications).

De même, aucune conclusion ne peut être tirée sur leur capacité à discriminer les défauts évolutifs ou les défauts monophasés auto-extincteurs et réamorçants survenant sur les réseaux à neutre compensé. Ceci est dû à une carence de la base d'événements simulés utilisée pour l'apprentissage des classifieurs, car elle ne contient pas d'événements complexes. Seuls des défauts permanents ayant des caractéristiques constantes y figurent. La portée de cette validation reste donc limitée.

## Chapitre 20 – Performances du système de reconnaissance

Au chapitre précédent, les systèmes de reconnaissance basés sur des systèmes de décision experts et sur des classifieurs SVM ont été mis au point et évalués à partir d'un large panel de perturbations simulées. L'analyse de ces simulations a permis de déterminer le comportement de ces systèmes dans des conditions optimales (faible niveau de bruit, absence d'harmoniques, fréquence réseau parfaitement constante...). Il convient de valider leurs performances en les confrontant à des perturbations réelles mesurées en réseau.

Pour ce faire, un large panel d'enregistrements d'événements réels est employé. Ils sont obtenus par des appareils de qualimétrie standards installés soit au poste source, soit au primaire des postes HTA/BT. Les données mesurées résultantes sont de qualité diverse avec une fréquence d'échantillonnage et une précision variables. Ces enregistrements sont employés pour évaluer la robustesse des critères de classification du système expert et celle des modèles appris par les classifieurs SVM à partir de perturbations simulées. Les performances obtenues renseignent sur la capacité de généralisation des systèmes développés à des conditions réelles, c'est-à-dire en présence de variations de régimes harmoniques, de transitoires proches ou encore de fausses segmentations. Tester ces systèmes de la sorte est essentiel car toutes ces perturbations ne sont pas reproductibles de manière réaliste par simulations.

### 20.1. Base de données d'enregistrements réels

La base d'événements réels présentée au paragraphe 11.1 pour évaluer les méthodes de segmentation développées est également utilisée pour l'évaluation des méthodes de reconnaissance. Les principales caractéristiques de cette base sont rappelées dans ce paragraphe.

La base est constituée d'enregistrements réels, regroupés selon le type et la direction des sources des perturbations. Elle comporte de nombreux représentants pour chaque perturbation du panel d'événements recherchés et considère différentes configurations, c'est-à-dire différentes positions du point de mesure par rapport à la source de la perturbation.

On rappelle que la base d'évaluation comporte environ 400 enregistrements de perturbations réalisés au jeu de barres de postes sources et environ 80 au niveau de postes de livraison clients. 150 correspondent à des perturbations amont, le reste étant localisé en aval des points d'observation. Ces perturbations surviennent sur les deux types de régimes de neutre. Chaque enregistrement peut comporter plusieurs perturbations distinctes ainsi que des perturbations évolutives.

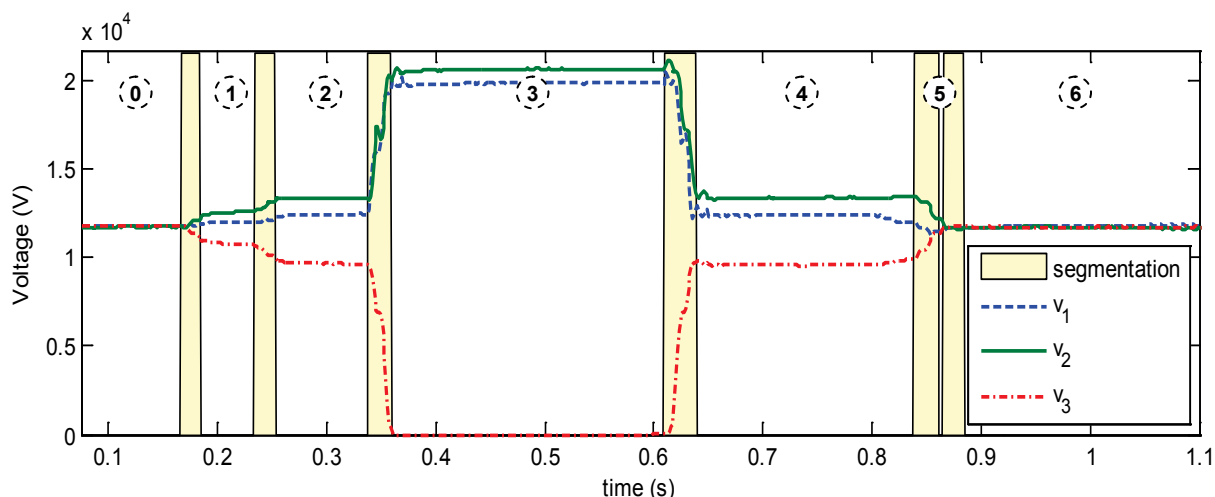
Les formes d'onde des perturbations sont échantillonnées à différentes fréquences (1.6, 2.5, 3.2, 5, 10 et 12.8 kHz). Cette multiplicité de fréquences est due à la diversité des types et des générations d'appareils de mesure utilisés. On note que les bases d'enregistrements échantillonnées à plus basse fréquence ne comportent pas d'enclenchements de batteries de condensateurs.

Toutes les catégories de défauts (monophasés sur réseaux impédant et compensé, biphasés isolés et à la terre, triphasés) ainsi que de nombreux enclenchements de départs et de connexions de batteries de condensateurs y sont représentés. Mais, malgré la grande diversité des perturbations présentes dans la base, certaines classes de perturbations ne comportent pas ou peu d'évènements. Les classes liées aux raccordements et déconnexions de charges ne sont pas évaluées dans ce chapitre, car la base d'enregistrements réels utilisée pour évaluer les systèmes experts et les classifieurs SVM ne comporte pas suffisamment d'évènements de ce type pour nous permettre de conclure.

Le Tableau 8 récapitule le nombre d'évènements de chaque classe présents dans la base de données utilisée pour évaluer les performances des différents systèmes de reconnaissance.

Type d'évènements		J.d.B.		Poste HTA/BT	
		Amont	Aval	Amont	Aval
Défauts	Monophasés sur :				
	• neutre compensé	*	231	*	*
	• neutre impédant	*	197	48	*
	Biphasés à la terre	*	35	5	*
	Biphasés-isolés	77	46	15	*
	Triphasés	48	35	12	*
Enclenchements de départs		25	67	23	*
Enclenchements de batteries		*	12	24	*
TCFM		30		60	

**Tableau 8 – Nombre d'évènements de chaque classe utilisés pour évaluer les systèmes de reconnaissance**



**Figure 20-1 – Exemple de défaut évolutif (perturbation de la Figure 13-1)**

On note que le nombre d'évènements indiqués dans le tableau ne correspond pas au nombre d'enregistrements de perturbations mais à celui de phases caractéristiques des perturbations correspondantes. Ainsi, pour certains enregistrements de perturbations (défauts réamorçants, défauts évolutifs...), plusieurs évènements sont considérés. Dans l'exemple de la Figure 20-1, quatre défauts monophasés et un déclenchement de charges doivent être identifiés par le système.

## 20.2. Architecture reposant sur les systèmes experts

### 20.2.1. Evaluation des performances du système expert

Les performances des systèmes experts définis au paragraphe 19.1 sont déterminées à partir des enregistrements des perturbations réelles présentées au paragraphe précédent. Le Tableau 9 résume les taux de reconnaissance de chaque classe de perturbations obtenus par ces systèmes de décision. Leurs performances globales sur l'ensemble de la base sont également présentées. Ces grandeurs supplémentaires permettent de renseigner sur le comportement du système en cas de mauvaises reconnaissances, c'est-à-dire de connaître sa propension à ne pas identifier et à mal identifier les différentes classes de perturbations.

Dans le Tableau 9, on ne tient compte du régime de neutre du réseau HTA que pour les défauts monophasés. Pour les autres catégories de perturbations, ce paramètre est jugé peu influent. Dans ce cas, les taux de reconnaissance, tels qu'ils sont présentés, reflètent les performances globales obtenues sur les deux types de régimes de neutre. Cette convention est également retenue pour l'évaluation des classifieurs SVM.

Type d'évènements		J.d.B.		Poste HTA/BT	
		Amont	Aval	Amont	Aval
Défauts	Monophasés sur :				
	• neutre compensé	x	98%	x	x
	• neutre impédant	x	99%	100%	x
	Biphasés à la terre	x	100%	80%	x
	Biphasés-isolés	100%	100%	100%	x
	Triphasés	100%	100%	100%	x
Enclenchements de départs		96%	97%	96%	x
Enclenchements de batteries		x	100%	96%	x
TCFM		100%		100%	
Performances globales	Erreurs de classification	0,3%			
	Fausse identifications	0,5%			
	Non-identification	0,8%			

Tableau 9 – Performances des systèmes experts sur la base des enregistrements réels

Dans le cas des systèmes experts, on rappelle qu'on considère qu'un évènement est correctement identifié lorsque sa classe a une vraisemblance supérieure à 50%. Si plusieurs classes de perturbations dépassent ce seuil, celle qui obtient la vraisemblance la plus élevée est retenue.

### 20.2.2. Analyse des performances

La capacité de discrimination des systèmes experts développés est importante. Les taux d'erreurs de classification, de fausses identifications et de non-identification sont tous trois très faibles. Ces constatations sont valables pour l'ensemble des types de perturbations. Aucune classe d'évènements ne semble leur poser de difficultés en particulier. Les constatations faites au chapitre précédent dans le cas des défauts fortement résistants n'ont pu être vérifiées à partir de la base d'enregistrements de perturbations réelles, car aucune perturbation de ce type n'y apparaît.

Les défauts monophasés auto-extincteurs et réamorçants affectant les réseaux à neutre compensé sont globalement correctement identifiés malgré les carences de la base d'apprentissage vis-à-vis de ce type de perturbations. On rappelle que seuls des défauts monophasés « classiques », c'est-à-dire les défauts non réamorçants et non auto-extincteurs, y ont été simulés. Ces carences ont été compensées lors de l'analyse critique de la base de données des indicateurs en adaptant les critères de vraisemblances. Le fort taux de reconnaissance de ces perturbations témoigne également de la fiabilité et de la précision de la méthode de segmentation événementielle développée.

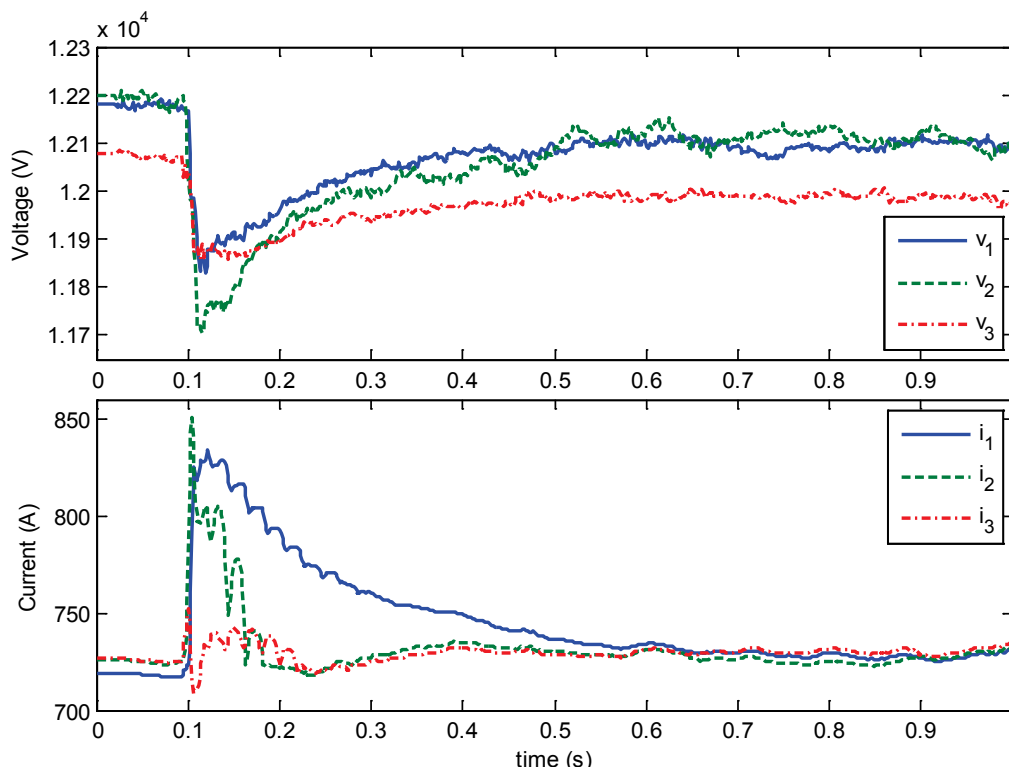
Quelles que soient les classes de perturbations considérées, les erreurs de segmentation ont peu impacté la qualité de la reconnaissance. Celles-ci ont en effet été prises en compte lors de l'établissement des critères de reconnaissance. Les plages de validité identifiées pour les différents indicateurs ont été intégrées aux fonctions de vraisemblance utilisées par les systèmes experts. Dans la mesure du possible, l'influence d'erreurs inférieures à  $\pm 2.5ms$  a été considérée. L'intégration de ce phénomène lors de la définition des critères a largement contribué à fiabiliser le système.

L'analyse des résultats de la reconnaissance n'a pas non plus montré de sensibilité particulière à des variations de régimes harmoniques ou au bruit. Ces problèmes ont en effet été traités en amont lors du choix et de la mise en œuvre des indicateurs de reconnaissance utilisés par les systèmes experts.

On note que le taux de fausses identifications du système de reconnaissance est très bas. Ses critères de reconnaissance lui permettent de distinguer de manière fiable les perturbations réelles des erreurs de segmentation.

Le système expert a par contre eu quelques difficultés avec des signatures de perturbations moins caractéristiques, c'est-à-dire dont le comportement n'est pas spécifique de sa classe. Certains de ces évènements s'éloignent trop du gabarit déterminé lors de l'analyse des simulations et posent problèmes à l'identification. Dans ces situations, la perturbation n'est pas reconnue par le système (non-identification).

La Figure 20-2 illustre une telle perturbation. Si les tensions suivent bien le comportement exponentiel attendu, deux des trois courants de ligne se comportent de manière moins caractéristique. La Figure 2-8 présentée dans la Partie 1 peut être utilisée à titre de comparaison.



**Figure 20-2 – Exemple de perturbations « atypiques »**  
Valeurs efficaces des tensions simples et des courants de lignes

## 20.3. Architecture reposant sur les classifieurs SVM

### 20.3.1. Evaluation des performances des classifieurs SVM

L'analyse de la base de données des événements simulés a permis d'évaluer les performances des différentes variantes des classifieurs SVM utilisés. Huit classifieurs distincts – tenant compte du type de régime de fonctionnement, du régime de neutre et de la position du point de mesure – ont été sélectionnés pour leur capacité de généralisation (§19.2). On rappelle que ces classifieurs SVM sont entraînés à partir d'une base de données dont la classe des événements non-considérés est sous-échantillonnée.

Leur application à la base d'enregistrements réels présentée au paragraphe 20.1 permet de les évaluer dans des conditions réelles. Le Tableau 10 résume le taux de reconnaissance de chaque classe de perturbations par les huit systèmes de classification SVM. Comme pour les systèmes experts, le régime de neutre n'est pris en compte que pour les défauts monophasés. Si les classifieurs SVM utilisés pour discriminer les autres types de perturbations diffèrent en fonction du régime de neutre, seule leur performance moyenne, obtenue pour les deux régimes de neutre, est ici présentée.

Type d'évènements		J.d.B.		Poste HTA/BT	
		Amont	Aval	Amont	Aval
Défauts	Monophasés sur :				
	• neutre compensé	✖	85%	✖	✖
	• neutre impédant	✖	99%	98%	✖
	Biphasés à la terre	✖	100%	80%	✖
	Biphasés-isolés	100%	100%	100%	✖
	Triphasés	100%	100%	100%	✖
Enclenchements de départs		96%	100%	96%	✖
Enclenchements de batteries		✖	92%	88%	✖
TCFM		100%		100%	
Performances globales	Erreurs de classification	2,1%			
	Fausse identifications	0,4%			
	Non-identification	2,5%			

**Tableau 10 – Performances des classifieurs SVM sur la base des enregistrements réels**

### 20.3.2. Analyse des performances

Les performances fournies par les classifieurs SVM sont globalement satisfaisantes. Leurs taux d'erreurs de classification, de fausses identifications et de non-identification sont faibles. Si pour de nombreuses classes de perturbations, elles sont équivalentes aux performances des systèmes experts, elles leur sont inférieures pour certaines classes de perturbations.

Les écarts les plus importants sont observés pour les perturbations transitoires causées par les enclenchements de batteries de condensateurs et par les défauts monophasés auto-extincteurs. Ces performances plus faibles ont principalement deux origines, toutes deux liées à des carences de la base de données d'apprentissage :

- ✓ Lors de sa création, les erreurs de segmentation n'ont pas été prises en compte, car la décomposition des perturbations simulées est quasi-exacte. Les fluctuations des indicateurs induites par l'imprécision de la décomposition des phases caractéristiques des perturbations n'apparaissent par conséquent pas dans la base.

On a vu au Chapitre 15 que ces erreurs affectent de manière importante la signature de la perturbation. Bien que rares, des situations mettant en défaut le processus de classification peuvent survenir. Les enclenchements de batteries de condensateurs sont les événements les plus affectés par ce phénomène car ce sont eux qui requièrent la plus grande précision de segmentation (§15.2.1).

- ✓ La base d'apprentissage des classifieurs SVM constituée par simulations paramétriques contient uniquement des défauts permanents. Les défauts monophasés auto-extincteurs et réamorçants



caractéristiques des réseaux compensés n'y figurent pas. Les variations des indicateurs liées aux interruptions des régimes transitoires par des nouveaux régimes transitoires ne sont donc pas reportées dans la base de données.

Ce type de perturbations est également sensible à la précision de la décomposition fournie par la phase de segmentation du fait de la brièveté des phénomènes analysés. Ces défauts sont donc affectés par les deux principales carences de la base d'apprentissage.

L'analyse des résultats montre que la méthode de classification est peu sensible aux variations de régimes harmoniques. Cette caractéristique est essentiellement liée à la prise en compte de cette problématique en amont lors du choix et de la mise en œuvre des indicateurs de reconnaissance.

Les systèmes de classification SVM permettent également une plus grande souplesse. Contrairement aux systèmes experts, ils sont en mesure d'identifier certaines perturbations dont le comportement est quelque peu éloigné celui observé habituellement (Figure 20-2).

Leur comportement en présence de fausses segmentations est proche de celui observé pour les systèmes experts. Cette problématique avait été prise en compte lors de la constitution de la base de connaissance en intégrant les jeux d'indicateurs déterminés en présence de fausses segmentations apparues sur des enregistrements réels. Leur inclusion dans la base de connaissance s'est donc avérée bénéfique.

Les quelques difficultés que les classifieurs SVM avaient eu à distinguer les défauts fortement résistants n'ont par contre pas pu être vérifiées en raison de l'absence de tels événements dans la base de tests.

Pour vérifier l'impact de la précision de la segmentation sur la reconnaissance des perturbations par les classifieurs SVM, une partie des simulations des enclenchements de batteries de condensateurs a été rejouée. En effet, lors de l'étude paramétrique précédente, les différents segments des perturbations étaient identifiés de manière exacte et l'unique décomposition obtenue était utilisée pour calculer les indicateurs de reconnaissance. Afin de tenir compte de la variabilité de l'erreur de segmentation, la décomposition fournie par l'algorithme est ajustée. Lors des nouvelles simulations, on fait en sorte qu'elle varie dans un intervalle de taille égale à 1 ms autour de la segmentation initiale. Pour chaque perturbation simulée, plusieurs décompositions et donc plusieurs jeux d'indicateurs distincts sont ainsi déterminés. Ces nouveaux jeux sont intégrés à la base de simulation et utilisés pour optimiser les classifieurs SVM.

Grâce à cette base de données « enrichie », le taux d'identification des enclenchements de batteries de condensateurs passe à 100% contre 92% et 87% précédemment. Pour cette catégorie de perturbations, ce taux de reconnaissance est équivalent à celui des systèmes experts.

Pour les défauts monophasés affectant les réseaux à neutre compensé, des opérations similaires devraient permettre d'améliorer les performances de reconnaissance des classifieurs SVM vis-à-vis de ces classes de perturbations. Toutefois, la prise en compte de la problématique de la segmentation ne suffit pas. Des enregistrements de défauts auto-extincteurs et réamorçants doivent également être intégrés à la base de d'événements simulés afin de limiter ses carences et de rendre le système plus efficace.

### 20.4. Comparaison des deux systèmes de classification

Les systèmes de classification reposant sur des systèmes experts ou des méthodes SVM proposent tous deux des performances d'identification élevées.

Confrontés à des perturbations réelles, les résultats présentés pour les classifieurs SVM sont légèrement inférieurs pour un certain nombre de classes de perturbations. On a toutefois vu que des performances équivalentes voire supérieures sont atteintes si les démarches de simulation paramétrique et d'apprentissage sont adaptées de manière à tenir compte de problématiques négligées lors de la constitution de la base d'apprentissage. Les phénomènes, tels que les erreurs de segmentation ou les variations des indicateurs liées à la présence de perturbations proches de types défauts réamorçants, doivent être considérés. Cela nécessite par contre la réalisation d'un plus grand nombre de perturbations et entraîne une augmentation conséquente de la taille de la base d'événements à analyser.

Ces considérations mises à part, chacun des deux systèmes de classification étudiés présente des avantages qui lui est propre.

Le système SVM permet une prise de décision rapide sur la classe de la perturbation observée. En effet, l'ensemble de la complexité de la méthode de reconnaissance est repoussée lors de la phase d'apprentissage de la structure des classes d'événements dans la base constituée par les indicateurs de reconnaissance. Une fois que cette étape est réalisée, la décision requiert la réalisation d'un faible nombre d'opérations. Une telle structure est donc adaptée à l'analyse en quasi-temps-réel des perturbations observées sur le réseau. Son coût calculatoire est par contre important puisque tous les indicateurs de reconnaissance doivent être calculés avant la prise de décision. Cette caractéristique les distingue des systèmes experts, car leur architecture ordonnancée leur permet de ne calculer que les indicateurs nécessaires à la progression du procédé d'identification.

La structure « un-contre-un » choisie pour le problème multi-classes présente une grande souplesse. Tant que la base d'indicateurs utilisée pour l'apprentissage reste identique, l'intégration de nouvelles classes dans le système de discrimination est aisée. Elle requiert uniquement l'entraînement de  $N$  classifieurs binaires supplémentaires,  $N$  étant le nombre de classes du problème de discrimination.

L'approche par apprentissage supervisé utilisée par les classifieurs SVM permet aussi de mettre à jour facilement les critères de séparation des classes. Si un nouvel évènement n'est pas reconnu efficacement par le système, son intégration dans la base d'apprentissage suivie de l'optimisation des  $N$  classifieurs binaires associés améliorent ses performances.

Par contre, si de nouveaux indicateurs de reconnaissance venaient à être utilisés pour caractériser les nouvelles perturbations recherchées, l'ensemble des classifieurs devraient être mis à jour à partir de la nouvelle base d'apprentissage.

La base d'évènements utilisée pour leur apprentissage doit également être la plus complète et la plus représentative possible afin de garantir des performances de reconnaissance élevées. Elle doit, entre autres, tenir compte des problématiques des perturbations proches et des erreurs de segmentation. La prise en compte, *a posteriori*, de tels phénomènes par les classifieurs SVM est en effet impossible.

Le système de décision expert présente des performances de classification équivalentes. Mais, contrairement aux classifieurs SVM, il a l'avantage d'avoir un coût calculatoire plus limité. Sa structure lui permet de ne calculer que les indicateurs jugés nécessaires à la poursuite de la discrimination des classes de perturbations. Cette approche est conforme à l'objectif d'analyse quasi-temps-réel des perturbations mesurées. En raison de leur structure de décision ordonnancée, les systèmes experts nécessitent par contre la réalisation d'un nombre important de tests avant l'obtention de la classe de perturbations finale. Leur prise de décision est donc moins rapide que celle permise par les classifieurs SVM.

L'architecture décisionnelle des systèmes experts proposée a l'avantage d'être facilement modulable. L'ajout de nouveaux critères de décision ou la prise en compte de nouvelles classes de perturbations requiert un investissement limité. La majorité des critères utilisés par le système est peu impactée par la prise en compte de nouvelles catégories d'évènements.

L'approche prise par les systèmes experts autorise également d'avantage de degrés de libertés. Les fluctuations des signatures des perturbations induites par des erreurs de segmentation ou par la présence de perturbations de type harmoniques et bruits sont plus facilement intégrées aux critères de reconnaissance. L'analyse préalable du comportement des indicateurs en présence de tels phénomènes a permis d'identifier leurs plages de validité et les inclure dans les critères. Contrairement aux classifieurs SVM, la robustesse de la prise de décision de ces systèmes est améliorée sans qu'un nombre important de simulations et de traitements supplémentaires (ajustement des intervalles caractéristiques des perturbations, simulations de perturbations proches...) soit requis.

On notera que les structures des systèmes experts proposés donnent facilement accès à des informations supplémentaires. Par exemple, la structure de la Figure 19-1 analysant les régimes permanents renseigne également sur l'évolution des défauts, c'est-à-dire si la perturbation reconnue

correspond à une augmentation ou une diminution de la résistance de défaut par rapport au dernier régime de fonctionnement en défaut.

La recherche de telles informations par des classifieurs SVM nécessiterait la définition de classes supplémentaires ainsi qu'un enrichissement conséquent de la base de données. Dans ces conditions, on ne pourrait plus seulement simuler des perturbations isolées. Des perturbations évolutives devraient également être traitées et incluses dans la base. Cet investissement conséquent se différencie de l'approche « système expert » qui requiert la définition d'un nombre limité de critères supplémentaires de faible complexité.

Une autre possibilité consisterait à utiliser un système hybride analysant les classes de perturbations classiques par des classifieurs SVM et déterminant certaines informations après coup avec un système expert de faible complexité.

Les systèmes experts et les classifieurs SVM ont prouvé leur fiabilité en présence de perturbations classiques réelles et simulées correspondant aux classes d'événements envisagées par le système. Il serait par contre intéressant de les confronter à des perturbations non prévues, telles que les démarrages de moteurs asynchrones ou des connexions de production décentralisée, afin de vérifier leur comportement.



## Conclusion générale

La mesure et l'analyse de la Qualité de l'Électricité fournie aux clients industriels et particuliers est un enjeu majeur pour les fournisseurs et commercialisateurs d'électricité. Elles reflètent une demande forte de la part d'un grand nombre de clients. Pour évaluer la Qualité d'Électricité, poser des diagnostics et proposer des solutions, des outils de traitements automatiques et intelligents sont nécessaires. Ils cherchent à détecter, identifier et localiser les événements responsables de creux et de variations de tension (défauts, enclenchements de départs, raccordement de charges...).

Aussi une thèse a été lancée afin de proposer de nouvelles méthodologies d'analyse et de reconnaissance des perturbations observées sur les réseaux de distribution HTA. Elle cherche à tirer partie des contextes technique (augmentation des puissances de calcul, réduction des coûts, amélioration des performances des appareils de qualimétrie...) et scientifique (développement des méthodes du traitement du signal et d'analyse de bases de données) favorables pour proposer un système d'identification performant capable d'identifier, automatiquement et en temps-réel, les événements observés sur le réseau.

En Partie 1, on a présenté les caractéristiques des principales sources de perturbations affectant les réseaux HTA. Un état de l'art des méthodes actuellement utilisées pour la détection, la segmentation, la caractérisation et la reconnaissance des perturbations y est effectué. Plusieurs insuffisances y ont été identifiées. On citera notamment la non-prise en compte des variations de régimes harmoniques lors de la phase de décomposition des formes d'onde ou la non-prise en compte des erreurs de segmentation lors de la définition des indicateurs et des critères d'identification. Ces considérations ont conduit à définir l'architecture du système de reconnaissance en deux niveaux développée au cours de cette thèse.

La mise au point des méthodes de segmentation présentées en Partie 2 s'est essentiellement appuyée sur l'analyse d'enregistrements de formes d'onde de perturbations réelles mesurées sur le réseau HTA. Deux méthodes distinctes ont été développées afin de répondre aux problématiques de fiabilité et de précision inhérentes à la décomposition des phases des perturbations.

La première méthode réalise la décomposition des régimes de fonctionnement en régimes transitoires et permanents successifs à partir des formes d'onde des tensions et de courants. Cette méthode est adaptée à l'analyse de la quasi-totalité des perturbations affectant les réseaux HTA. Elle procède en trois étapes.

## Conclusion générale

---

Au cours de l'étape de pré-traitement, les formes d'onde sont analysées de manière à faire apparaître les intervalles transitoires. De nombreuses méthodes pouvant être employées à cet effet ont été testées (filtrage passe-haut, analyse multi-résolution, filtrage adaptatif...). Deux traitements ont été identifiés comme présentant les meilleures capacités de détection, de résolution et de stabilité en régime permanent. Il s'agit du filtre anti-harmoniques impairs  $T_0/2$ -AHF et du filtre de Kalman associé à un modèle harmonique réduit  $HKF_{1357}$ .

Les indices de segmentation déterminés à partir de ces méthodes de filtrage sont ensuite analysés par le procédé de segmentation adaptatif. Afin de tenir compte des variations de régime harmonique et de la présence de perturbations rapprochées, le procédé développé adapte ses seuils de détection en fonction du comportement local des indicateurs de segmentation. Il assure également une plus grande robustesse en régime permanent et améliore son taux de fausses alarmes.

Au cours de la dernière étape, deux opérations sont appliquées aux segmentations déterminées. Leur retard est d'abord corrigé *a posteriori*. Ce processus de correction améliore la précision de la segmentation et contribue ainsi à fiabiliser les étapes de reconnaissance suivantes. Les segmentations étant obtenues à partir de l'analyse indépendante des formes d'onde mesurées, elles sont ensuite fusionnées de manière à proposer une décomposition uniforme des perturbations.

La deuxième méthode propose une méthodologie de segmentation dédiée à un type de perturbations particulier : les défauts monophasés survenant sur les réseaux à neutre compensé. Certains de ces défauts ont en effet la particularité de ne pas présenter de régimes permanents entre leurs régimes transitoires successifs. La méthode utilisée est complémentaire à la précédente dont elle exploite la décomposition. Elle n'intervient pas directement à la suite de l'étape de segmentation mais requiert la réalisation d'un premier cycle de reconnaissance qui détermine si la perturbation détectée est vraisemblablement un défaut monophasé.

Cette seconde méthode de segmentation se fonde sur la tension homopolaire dont elle analyse le comportement pour distinguer les régimes transitoires d'apparition et d'extinction des défauts monophasés. Le retard de la segmentation ainsi déterminée est ensuite corrigé au cours d'une dernière étape.

L'association de ces deux méthodes de segmentation contribue à décomposer les formes d'onde des perturbations de manière fiable et précise. La qualité de la décomposition obtenue est, dans la très grande majorité des cas, à même d'assurer la bonne caractérisation de l'ensemble des perturbations recherchées. Elle améliore également les performances de l'étape suivante de reconnaissance.

Sur la base de la décomposition des formes d'onde obtenue à l'étape de segmentation précédente, une structure d'analyse différenciée des régimes de fonctionnement des perturbations (régimes permanents et régimes transitoires) est proposée en Partie 3. Elle repose sur l'analyse critique des

## Conclusion générale

---

perturbations analysées qui a permis d'identifier un ensemble de caractères discriminants pour chaque type de perturbations. Ces caractères sont exploités par plusieurs indicateurs synthétisant le comportement des formes d'onde des perturbations au cours de leurs régimes transitoires et permanents.

Le traitement distinct des régimes transitoires et permanents permet d'utiliser des méthodes adaptées à l'analyse de différentes dynamiques de perturbations. Des grandeurs moyennées suffisent à analyser les régimes permanents. Pour les régimes transitoires, des traitements capables de caractériser leur importante dynamique sont utilisés (pré-traitement par filtrage anti-harmoniques, identification de modèles paramétriques...). L'adaptation des indicateurs à ces régimes rend plus fiable l'extraction des caractéristiques des perturbations. À partir de ces considérations, deux jeux d'indicateurs distincts sont spécifiés : un par type de régimes de fonctionnement.

Différents phénomènes ont également été pris en compte lors de la sélection des indicateurs de reconnaissance et de la mise au point des méthodes utilisées pour les extraire. Leur robustesse vis-à-vis des erreurs de mesure et des perturbations harmoniques permanentes a été étudiée et leur sensibilité aux erreurs de segmentation a été considérée.

En Partie 4, deux méthodologies de reconnaissance ont été mises en concurrence : des systèmes de décision expert et des systèmes à apprentissage supervisé basés sur des classifieurs SVM. L'architecture du système de reconnaissance développée exploite les résultats de l'analyse différenciée des régimes transitoires et permanents. Un système de décision distinct est ainsi défini pour chaque type de régime de fonctionnement afin d'exploiter les jeux d'indicateurs précédents.

L'apprentissage de ces deux types de systèmes a été réalisé à partir d'un grand nombre d'enregistrements de perturbations simulées. A cet effet, un outil d'interfaçage entre le logiciel de simulations électrotechniques EMTP-RV® et notre logiciel d'analyse a été développé. Il a permis de simuler les nombreuses configurations du réseau envisagées et d'obtenir une représentation réaliste des domaines d'existence des indicateurs de reconnaissance. Afin de maintenir le nombre de simulations dans des proportions raisonnables, des stratégies de commande reposant sur les méthodes d'interpolation par krigeage et sur l'analyse du critère d'amélioration estimée (critère EI) ont été utilisées.

Cette large base d'apprentissage a été employée pour calibrer les différents systèmes de reconnaissance. Son analyse a permis de définir la structure des systèmes de décision experts. Pour les classifieurs SVM, elle a été employée afin d'évaluer la capacité de généralisation de leurs différentes variantes par validation-croisée. La méthode de classification « un-contre-un » s'est avérée très performante. Elle profite du fort pouvoir séparateur des jeux d'indicateurs utilisés pour discriminer les différentes classes de perturbations de manière efficace.



## Conclusion générale

---

Les performances des différents systèmes de classification ont ensuite été vérifiées sur un large éventail d'enregistrements de perturbations réelles. La décomposition des perturbations étant assurée par la méthode de segmentation présentée en Partie 2, cette évaluation a également permis d'estimer les performances du système de reconnaissance dans sa globalité. Elle montre que les systèmes de reconnaissance, basés sur des systèmes de décision experts et SVM, présentent des performances de classification proches et que, dans les deux cas, les taux d'identification des régimes de fonctionnement des perturbations sont élevés.

Sur la base des enregistrements réels, le système expert s'est toutefois avéré un peu plus performant que les classifieurs SVM. Cette plus grande efficacité s'explique essentiellement par la prise en compte de phénomènes, tels que l'imprécision de la segmentation ou la présence de perturbations temporellement proches, lors de la définition des critères d'identification du système expert. L'intégration de tels phénomènes par les classifieurs SVM est moins aisée. Elle nécessiterait leur inclusion dans la base de données d'apprentissage, ce qui complexifierait d'autant sa constitution et la démarche d'apprentissage qui suivrait.

En conclusion, ces travaux de thèse ont permis de proposer une nouvelle architecture de reconnaissance automatique des perturbations observées sur les réseaux de distribution HTA. Plusieurs types d'événements électrotechniques ont été étudiés : les différents types de défauts, les enclenchements de batteries de condensateurs de compensation, les enclenchements de départs et les signaux tarifaires...

Les méthodes de segmentation, de caractérisation et de reconnaissance proposées dans ce manuscrit peuvent être étendues à des points d'observation du réseau différents de ceux actuellement considérés (jeu de barres des postes sources et primaire des postes HTA/BT).

Une extension immédiate consiste à les appliquer à des points de mesure en réseau, c'est-à-dire en milieu de départ HTA. Dans cette configuration, les phases de segmentation et de caractérisation sont réutilisables telles quelles, mais les critères de décision utilisés pour la reconnaissance des différentes classes de perturbations doivent être redéfinis en conséquence.

Une implantation sur le réseau BT d'installations clients est également envisageable. Dans ce cas, on devra s'assurer de la robustesse des méthodes de segmentation et de caractérisation développées, car les formes d'onde mesurées sur ces réseaux présentent généralement une pollution harmonique plus importante et des variations de régimes de fonctionnement plus fréquentes que celles observées sur les réseaux de distribution HTA.

De nouvelles catégories d'événements peuvent aussi être examinées afin d'étendre le champ d'application du système de reconnaissance présenté dans ce manuscrit. On citera par exemple, les démarrages de moteurs ou les connexions de productions décentralisées (EnR).

## Conclusion générale

---

Les perturbations engendrées par les moteurs affectent principalement les réseaux BT. Elles ont une dynamique très différente des autres types de perturbations recherchées. Des indicateurs supplémentaires, dédiés à leur caractérisation, devront par conséquent être définis.

La présence de sites de production décentralisée sur le réseau étudié a un double effet sur le système reconnaissance. Ces sources supplémentaires peuvent non seulement perturber le réseau, mais elles impactent directement les caractéristiques de certaines perturbations. Les signatures des défauts survenant sur le réseau sont particulièrement affectées : jusqu'au fonctionnement des protections du site de production décentralisée, les défauts sont alimentés à la fois par le réseau amont et par la production décentralisée. La prise en compte de telles configurations nécessitera la réalisation d'études dédiées qui permettront la définition de critères de reconnaissance adaptés.

L'architecture de reconnaissance ainsi que les méthodologies utilisées pour l'apprentissage des systèmes de décision proposées dans ce manuscrit restent toutefois applicables quel que soit le point de mesure considéré. Seuls le nombre et la définition des classes d'évènements à considérer varient.



## **Annexes**



## Annexe A – Impact des fréquences fondamentale et d'échantillonnage

### A.1. Impact sur le comportement de la valeur efficace

La valeur efficace d'une forme d'onde se calcule sur une fenêtre glissante de longueur  $T$  à l'aide de la formule (A-1).

$$x_{Eff}(t) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} x(t)^2 dt \quad (\text{A-1})$$

Pour un signal sinusoïdal d'amplitude  $A$  et de fréquence  $f_0$ , l'erreur de calcul due à son observation non synchronisée est déterminée par la relation (A-2). On ne considère pas l'éventuel déphasage du signal puisque le calcul sur la fenêtre glissante retire toute notion de déphasage.

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} x(t)^2 dt - \frac{1}{T_0} \int_t^{t+T_0} x(t)^2 dt = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} A \sin(\omega_0 t)^2 dt - \frac{1}{T_0} \int_t^{t+T_0} A \sin(\omega_0 t)^2 dt \quad (\text{A-2})$$

On notera que la primitive d'une fonction sinusoïdale au carré est déterminée par la relation suivante

$$\int \sin(at)^2 dt = \frac{t}{2} - \frac{1}{4a} \sin(2at) \quad (\text{A-3})$$

A l'aide de cette expression, l'erreur d'estimation peut s'exprimer comme suit :

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) = & A \frac{1}{T} \left( \frac{t+T}{2} - \frac{\sin(2\omega_0(t+T))}{4\omega_0} - \frac{t}{2} + \frac{\sin(2\omega_0 t)}{4\omega_0} \right) \\ & - A \frac{1}{T_0} \left( \frac{t+T}{2} - \frac{\sin(2\omega_0(t+T_0))}{4\omega_0} - \frac{t}{2} + \frac{\sin(2\omega_0 t)}{4\omega_0} \right) \end{aligned} \quad (\text{A-4})$$

$$\varepsilon(t) = -\frac{A}{T} \left( \frac{\sin(2\omega_0(t+T))}{4\omega_0} - \frac{\sin(2\omega_0 t)}{4\omega_0} \right) + \frac{A}{T_0} \left( \frac{\sin(2\omega_0(t+T_0))}{4\omega_0} - \frac{\sin(2\omega_0 t)}{4\omega_0} \right) \quad (\text{A-5})$$

Afin de simplifier cette expression, on introduit la variation de la taille de la fenêtre d'observation due à la désynchronisation avec la fréquence fondamentale  $\Delta T = T - T_0$ . On développe également les termes du second membre.

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) = & -\frac{A}{T} \left( \frac{\sin(2\omega_0(t+\Delta T)) \cos(2\omega_0 T_0) + \cos(2\omega_0(t+\Delta T)) \sin(2\omega_0 T_0)}{4\omega_0} - \frac{\sin(2\omega_0 t)}{4\omega_0} \right) \\ & + \frac{A}{T_0} \left( \frac{\sin(2\omega_0 t) \cos(2\omega_0 T_0) + \cos(2\omega_0 t) \sin(2\omega_0 T_0)}{4\omega_0} - \frac{\sin(2\omega_0 t)}{4\omega_0} \right) \end{aligned} \quad (\text{A-6})$$

$$\varepsilon(t) = \frac{A}{2\pi T} \left( \frac{\sin(2\omega_0(t+\Delta T))}{4} - \frac{\sin(2\omega_0 t)}{4} \right) \quad (\text{A-7})$$

On développe l'expression précédente afin d'isoler les termes en  $\Delta T$ .

$$\varepsilon(t) = \frac{A}{2\pi 4T} (\sin(2\omega_0 t) (\cos(2\omega_0 \Delta T) - 1) + \sin(2\omega_0 \Delta T) \cos(2\omega_0 t)) \quad (\text{A-8})$$

Pour des  $\Delta T$  de faible amplitude, le premier terme prend des valeurs proches de 0. Cette approximation permet de simplifier l'expression (A-9) comme suit :

$$\varepsilon(t) \sim \frac{A}{2\pi} \frac{T_0}{4T} \sin(2\omega_0 \Delta T) \cos(2\omega_0 t) \quad (\text{A-9})$$

L'erreur maximale sur la valeur efficace en approximant la valeur absolue de l'expression précédente :

$$\varepsilon_{\max} \sim \frac{A}{2\pi} \frac{T_0}{4T} \max |\sin(2\omega_0 \Delta T) \cos(2\omega_0 t)| = \frac{A}{2\pi} \frac{T_0}{4T} \sin(2\omega_0 \Delta T) \quad (\text{A-10})$$

Cette expression peut se réécrire sous la forme suivante :

$$\varepsilon_{\max} \sim \frac{A}{2\pi} \frac{\sin\left(2\pi \cdot 2 \frac{\Delta T}{T_0}\right)}{4 \left(1 + \frac{\Delta T}{T_0}\right)} \quad \text{Où} \quad \frac{\Delta T}{T_0} = \frac{\Delta f / f_0}{1 - \Delta f / f_0} \sim \frac{\Delta f}{f_0} \quad (\text{A-11})$$

En intégrant l'erreur sur la fréquence, on retrouve la relation (A-12)

$$\varepsilon_{\max} \sim \frac{A}{2\pi} \frac{\sin\left(2\pi \cdot 2 \frac{\Delta f}{f_0}\right)}{4 \left(1 + \frac{\Delta f}{f_0}\right)} \sim \frac{A}{2} \frac{\Delta f}{f_0} \quad (\text{A-12})$$

## A.2. Impact sur le filtrage anti-harmoniques

La non-synchronisation de la fréquence d'échantillonnage  $f_e$  avec celle du fondamental  $f_{0 \text{ estimée}}$  introduit une erreur sur la fréquence de référence du filtrage anti-harmoniques  $f_{0 \text{ numérique}}$ . Cette erreur  $\Delta f_0$  s'exprime sous la forme suivante :

$$\Delta f_0 = f_{0 \text{ estimée}} - f_{0 \text{ numérique}} = f_{0 \text{ estimée}} - \frac{f_e}{\left\lfloor \frac{f_e}{f_{0 \text{ estimée}}} \right\rfloor} = f_{0 \text{ estimée}} \left(1 - \frac{X}{[X]}\right) \quad (\text{A-13})$$

$$\text{Où : } X = \frac{f_e}{f_{0 \text{ estimée}}}$$

Pour simplifier cette expression, on introduit une grandeur « fictive », la fréquence  $f_{e \text{ synchrone}}$ . Cette fréquence est synchrone avec la fréquence fondamentale  $f_{0 \text{ estimée}}$  :  $f_{e \text{ synchrone}} = k f_{0 \text{ estimée}}$ , où  $k \in \mathbb{N}^*$ . A l'aide de cette grandeur, la variable  $X$  est réécrite de la manière suivante :

$$X = \frac{f_e}{f_{0 \text{ estimée}}} = \frac{f_{e \text{ synchrone}}}{f_{0 \text{ estimée}}} - \frac{\Delta f_e}{f_{0 \text{ estimée}}} = k - \frac{\Delta f_e}{f_{0 \text{ estimée}}} \quad (\text{A-14})$$

$$\text{Où : } \Delta f_e = f_{e \text{ synchrone}} - f_e$$

$$k \in \mathbb{N}^* \text{ tel que : } -f_{0 \text{ estimée}}/2 \leq f_{e \text{ synchrone}} - k f_{0 \text{ estimée}} < f_{0 \text{ estimée}}/2.$$

En réinjectant cette expression dans la relation (A-13), on obtient :

$$\Delta f_0 = f_{0 \text{ estimée}} \left(1 - \frac{k - \frac{\Delta f_e}{f_{0 \text{ estimée}}}}{k}\right) = f_{0 \text{ estimée}} \frac{\frac{\Delta f_e}{f_{0 \text{ estimée}}}}{\left\lfloor \frac{f_e}{f_{0 \text{ estimée}}} \right\rfloor} \quad (\text{A-15})$$

Par définition de la fréquence d'échantillonnage synchrone, le rapport  $\Delta f_e / f_{0 \text{ estimée}}$  est compris entre  $-1/2$  et  $1/2$ . On retrouve ainsi la relation (7-10).

## Annexe B – Description des réseaux-types

### B.1. Points de mesure considérés

Quelle que soit la nature de la perturbation simulée, le comportement du réseau est observé en plusieurs points de mesure (Figure B-2). Ils sont localisés, au jeu de barres du poste pour lequel les perturbations sont situées en aval (*J.d.b. 1*), au jeu de barres d'un poste adjacent (*J.d.b. 2*) ainsi qu'au primaire de certains postes HTA/BT. Ces derniers points de mesure se trouvent sur le départ responsable de la perturbation (*Départ a*) et sur un départ adjacent (*Départ b*). Les caractéristiques de puissance des charges situées en aval de ces points sont différentes afin d'illustrer un large panel de situations.

Ainsi, pour chaque simulation réalisée, le comportement des tensions et des courants est analysé en huit à dix points de mesure différents. Ils permettent de limiter le nombre de jeux de simulations à réaliser puisqu'avec une seule simulation, on a accès à un grand nombre de situations différentes (caractéristiques des réseaux amont et aval, position relative de la source de la perturbation, position de la source de la perturbation par rapport aux points de mesure...).

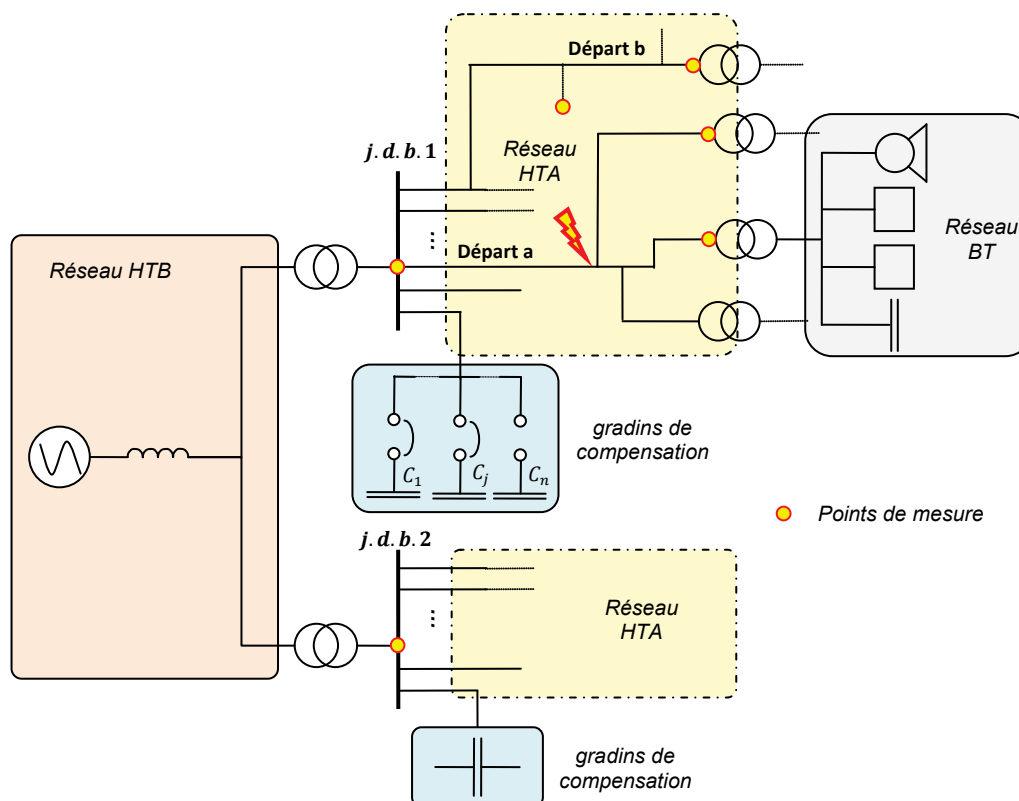


Figure B-1 – Localisation des points de mesure sur les réseaux-types



## **B.2. Configurations des perturbations simulées**

Les configurations utilisées pour simuler les perturbations dépendent du type de la perturbation.

### **Défauts**

Pour les défauts, trois configurations sont distinguées. Le défaut est localisé, soit sur le réseau HTA d'un départ (Départ a), soit en aval d'un transformateur de livraison client, soit sur le réseau HTB en amont du poste source (J.d.b. 1). Pour chacune de ces configurations, la position relative de la source de la perturbation varie.

- ✓ Pour un défaut sur le réseau HTA, seul le point de mesure du jeu de barres du poste source affecté (J.d.b. 1) considère la perturbation en aval.
- ✓ Pour un défaut sur le réseau HTB, tous les points de mesure l'observent d'un point de vue amont.
- ✓ Pour un défaut chez un client, les points de mesure du poste (J.d.b. 1) et du client perturbateur sont les seuls à voir la perturbation en aval.

### **Enclenchements de départs**

Pour les enclenchements de départs, une unique configuration est envisagée. Il s'agit d'analyser le réenclenchement d'un départ du poste 1. Ce phénomène est considéré, par le point de mesure du poste source (J.d.b. 1) ainsi que par ceux du départ réenclenché, comme étant aval.

### **Enclenchements de batteries de condensateurs**

Pour les enclenchements de batteries de condensateurs de compensation, deux configurations sont considérées : l'enclenchement d'un gradin au poste source ou sur la partie HTA à un poste de livraison. Dans le premier cas, seul le point de mesure du poste (J.d.b. 1) voit la perturbation en aval. Dans le second, l'origine de la perturbation d'enclenchement est également en aval pour celui localisé au niveau de la batterie réenclenchée.

## **B.3. Architecture des réseaux-types**

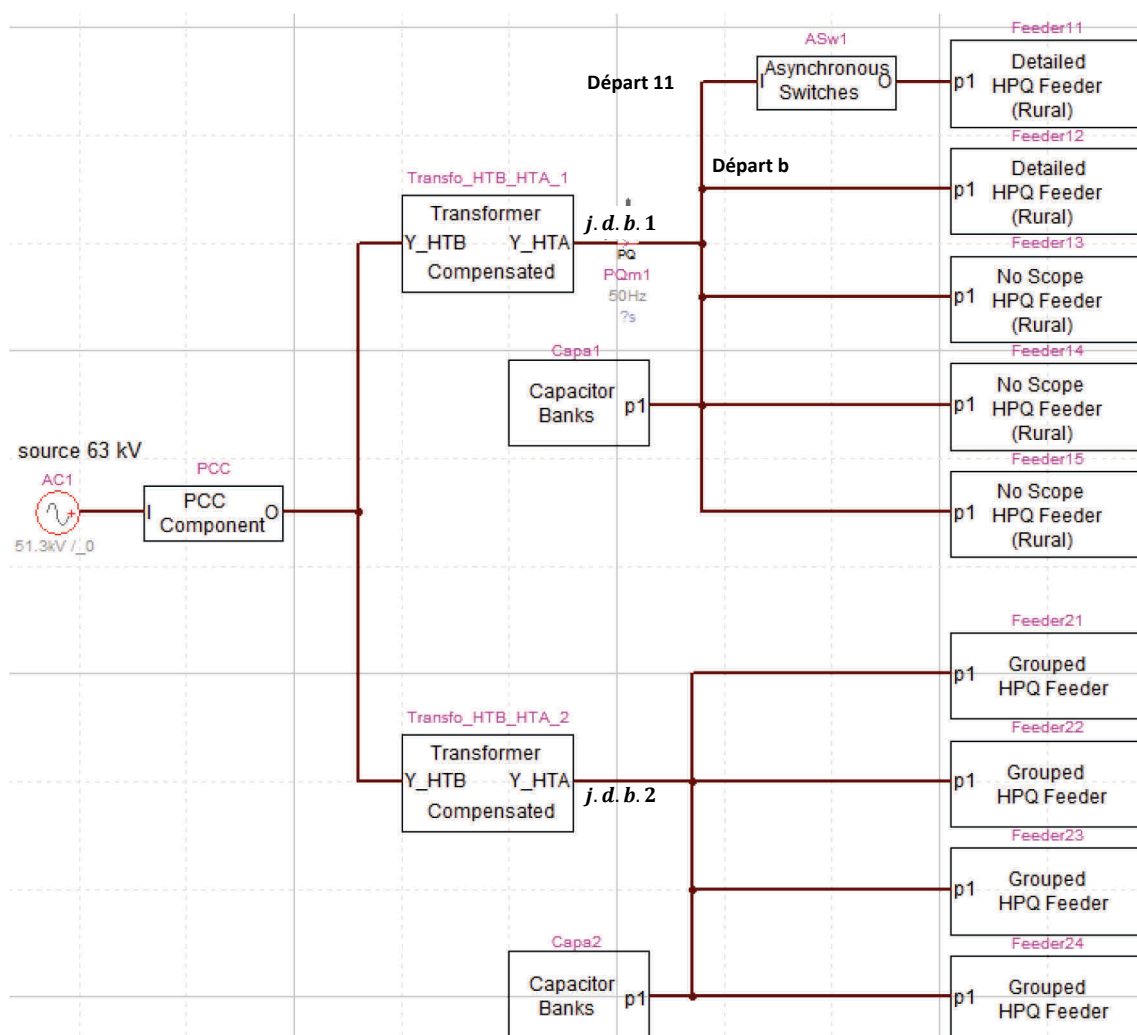
### **B.3.1. Structure des réseaux**

Nous avons défini plusieurs réseaux-types pour couvrir un maximum de configurations. Leurs structures sont spécifiques des réseaux HTA ruraux et urbains. Les tendances de leurs principaux paramètres sont présentées au paragraphe 18.2.

La Figure B-2 présente un des réseaux ruraux simulés par le logiciel EMTP-RV. Son principal réseau d'étude (J.d.b.1) comporte cinq départs (Feeder1i), une batterie de condensateurs de compensation constituée de plusieurs gradins (Capa1), un transformateur HTB/HTA avec son système de mise à la terre (Transfo\_HTB\_HTA\_1). Chacun de ces départs a une structure détaillée comme celle présentée

au paragraphe suivant. Le second réseau de distribution comporte également plusieurs départs (Feeder2i), une batterie de compensation (Capa2) et un transformateur HTB/HTA (Transfo\_HTB\_HTA\_2). La structure de ses départs est beaucoup moins précise afin de limiter le temps de simulation. Vu que seul le point de mesure considéré est situé au niveau du jeu de barres, cette simplification a peu d'incidence.

Les deux transformateurs de distribution sont connectés à un réseau amont dont les caractéristiques sont variables (PCC, rapport R/X...).



**Figure B-2 – Représentation générique d'un réseau rural à neutre compensé sous EMTP-RV® dans le cadre de la simulation des perturbations d'enclenchement du départ 11**

### B.3.2. Structure des départs

La topologie et les composants des départs (puissance des charges, caractéristiques des lignes, caractéristiques des transformateurs HTA/BT...) sont adaptés selon que le réseau est plutôt rural ou urbain. La topologie de ces départs et leur puissance globale sont facilement modifiables à l'aide de 4 commutateurs (SSw1, SSw2, SSw3 et SSw4).

## Annexe B – Description des réseaux-types

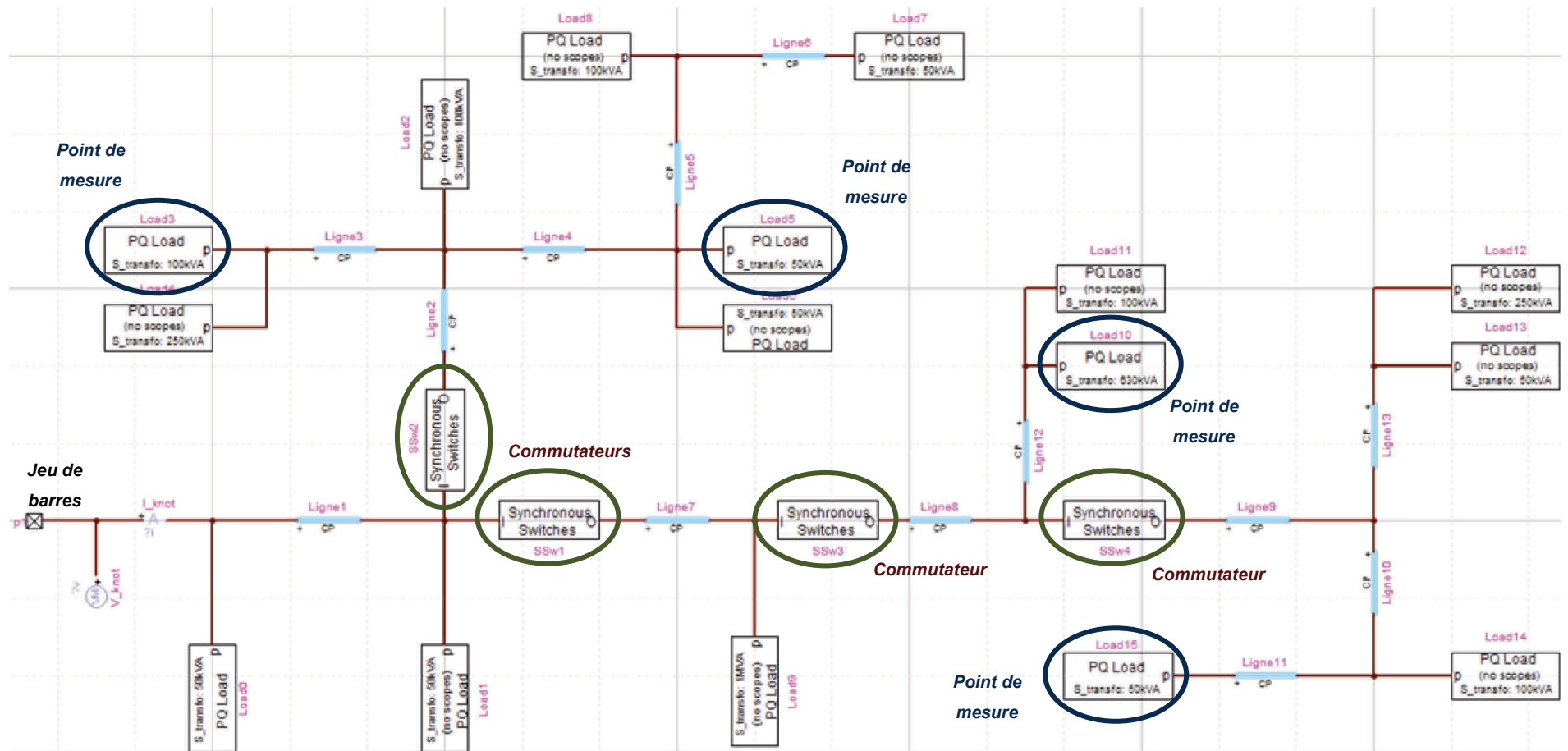


Figure B-3 – Représentation générique d'un départ rural sous EMTP-RV®

## Annexe C – Commande des simulations paramétriques

### C.1. Interpolation spatiale par krigeage

#### C.1.1. Principe de l'interpolation par krigeage

Le krigeage est une méthode d'interpolation tenant compte de la structure de dépendance spatiale des données analysées. Il prévoit leur comportement sur l'ensemble de l'espace d'observation à partir d'un nombre de points limité.

Soit une grandeur  $Z$  évaluée en  $n$  points  $x$  de l'espace d'observation  $D$  ( $x \in D$ ). La méthode de krigeage formule l'hypothèse selon laquelle les données analysées  $Z(x)$  comportent deux parties : une *partie régressive*  $\mu(x)$  et une *partie aléatoire* gaussienne  $\delta(x)$  (C-1).

- ✓ La *partie régressive déterministe* correspond au modèle de tendance.

Dans le cas du *krigeage ordinaire*, cette partie se réduit à une constante de valeur non déterminée  $\mu(x) = \mu$ . Ce modèle suppose une stationnarité du second ordre [BAI05].

Pour un *krigeage universel*, le modèle de tendance est plus complexe car l'hypothèse de stationnarité est relaxée [BAI05, LOP02]. Il s'exprime sous la forme :  $\mu(x) = \sum f_j(x)\beta_j$ . L'intérêt d'un tel modèle est évoqué dans cette annexe. Par souci de simplicité, on n'y présente que les équations et les formalisations mathématiques correspondant à l'interpolation par krigeage ordinaire.

- ✓ La *partie aléatoire* représente l'erreur stochastique. Sa moyenne est nulle et sa structure de covariances ( $E[Z(x_1), Z(x_2)] = \gamma(x_1 - x_2)$ ) suit un modèle qui introduit une structure de dépendance spatiale des données. Cette structure  $\gamma(\cdot)$  est explicitée au paragraphe suivant.

$$Z(x) = \mu(x) + \delta(x)$$

(C-1)

Où :  $\mu(\cdot)$  est la partie déterministe de l'espérance de  $Z(\cdot)$

$\delta(\cdot)$  est une fonction aléatoire stationnaire et d'espérance nulle dont la structure de dépendance est connue.

A partir des  $n$  points d'observation, le krigeage réalise la *meilleure prévision non biaisée et de variance minimale* du comportement de la grandeur analysée  $Z(\cdot)$  sur l'ensemble de l'espace d'observation  $D$ . Cette prédiction est désignée par le terme « best linear unbiased predictor » en anglais ou « BLUP ». Ainsi, pour tout point  $x_j$  non échantillonné de l'espace d'observation, la grandeur  $Z(\cdot)$  peut être approximée.

La prédiction déterminée par krigeage vérifie les propriétés suivantes (C-2) [BAI05] :

- ✓ La prédiction est calculée par combinaison linéaire des valeurs des paramètres aux différents points d'observation  $Z(\mathbf{x}_k)$ . Les poids  $\lambda_k(\mathbf{x})$  sont les inconnues du système d'équations. La prévision par krigeage ne possède pas de biais.
- ✓ Les poids  $\lambda_k(\mathbf{x})$  minimisent la variance  $\text{var}[\hat{Z}(\mathbf{x}) - Z(\mathbf{x})]$ .

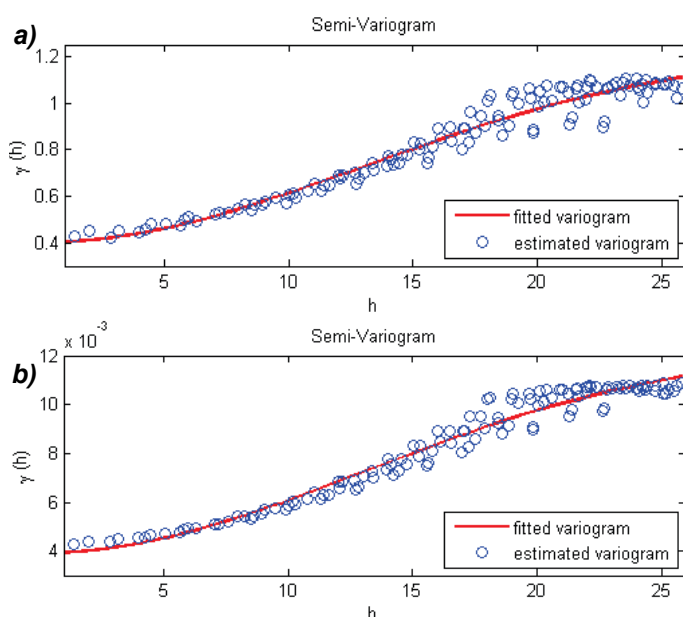
$$\begin{cases} \hat{Z}(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^n \lambda_k(\mathbf{x}) Z(\mathbf{x}_k) \\ E[\varepsilon(\mathbf{x})] = E[\hat{Z}(\mathbf{x}) - Z(\mathbf{x})] = 0 \\ \hat{\sigma}^2(\mathbf{x}) = \text{var}[\hat{Z}(\mathbf{x}) - Z(\mathbf{x})] = E[(\hat{Z}(\mathbf{x}) - Z(\mathbf{x}))^2] \end{cases} \quad (\text{C-2})$$

La méthode d'interpolation par krigeage ordinaire recherche les coefficients  $\lambda(\mathbf{x}_k)$  afin de déterminer le « BLUP ». Ces coefficients dépendent de la localisation des observations et de leur structure de dépendance spatiale.

L'erreur de krigeage s'obtient à l'aide de la fonction de covariance décrivant la dépendance spatiale  $\gamma(Z(\mathbf{x}_i), Z(\mathbf{x}_j))$  entre les points d'observation du domaine d'analyse  $D$ , où  $\mathbf{x}_{i,j}$  sont deux points du domaine  $D$ .

### C.1.2. Structures de dépendance spatiale

Comme la partie régressive du modèle (C-1), la structure de dépendance de la fonction  $\delta(\cdot)$  doit également être spécifiée. Son modèle est déterminé par analyse des variogrammes des données étudiées (Figure C-1). Ces variogrammes reflètent leur variabilité spatiale régionale [LOP02].



**Figure C-1 – Variogrammes des indicateurs portant sur les variations des courants de lignes (a) et des puissances actives (b) observées à l'enclenchement d'un départ**

### C.1.3. Algorithme d'interpolation par krigeage

On définit plusieurs grandeurs pour simplifier l'expression du problème d'interpolation. Elles dépendent des modèles de tendance  $\mu(\cdot)$  et de dépendance spatiale  $\gamma(\cdot)$  choisis :

- ✓ la matrice de covariances,  $C$  (C-3).

$$C = \begin{bmatrix} \gamma(Z(x_1), Z(x_1)) & \gamma(Z(x_1), Z(x_2)) & \dots & \gamma(Z(x_1), Z(x_n)) \\ \gamma(Z(x_2), Z(x_1)) & \gamma(Z(x_2), Z(x_2)) & \dots & \gamma(Z(x_2), Z(x_n)) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma(Z(x_n), Z(x_1)) & \gamma(Z(x_n), Z(x_2)) & \dots & \gamma(Z(x_n), Z(x_n)) \end{bmatrix} \quad (C-3)$$

- ✓ le vecteur des coefficients de pondération,  $\lambda$  (C-4).

$$\lambda(x) = [\lambda_1(x) \quad \lambda_2(x) \quad \dots \quad \lambda_n(x)]^T \quad (C-4)$$

- ✓ le vecteur des covariances entre les points d'observation  $x_j$  et le point de mesure  $x$ ,  $K$  (C-5).

$$K(x) = [\gamma(Z(x), Z(x_1)) \quad \gamma(Z(x), Z(x_2)) \quad \dots \quad \gamma(Z(x), Z(x_n))]^T \quad (C-5)$$

Le système obtenu correspond à un problème de minimisation sous contraintes. Il est résolu en employant la méthode du multiplicateur de Lagrange. Avec les notations précédentes, le système déterminant les coefficients de pondération du signal s'exprime à l'aide de la relation (C-6).

$$\left[ \begin{array}{c|c} C & \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \\ \hline \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} & 0 \end{array} \right] \begin{bmatrix} \lambda(x) \\ \mu(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K(x) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (C-6)$$

Où :  $\mu(x)$  est le multiplicateur de Lagrange

Une fois les coefficients du vecteur  $\lambda(x)$  déterminés, la valeur prédite s'écrit avec la relation (C-7). L'incertitude de cette prédiction est estimée à l'aide de l'expression suivante (C-7). Cette grandeur est essentielle à la stratégie d'échantillonnage qui est commandée par la méthode d'EI présentée au paragraphe C.2.

$$\hat{\sigma}^2(x) = cov(Z(x), Z(x)) - \lambda(x)^T K(x) - \mu(x) \quad (C-7)$$

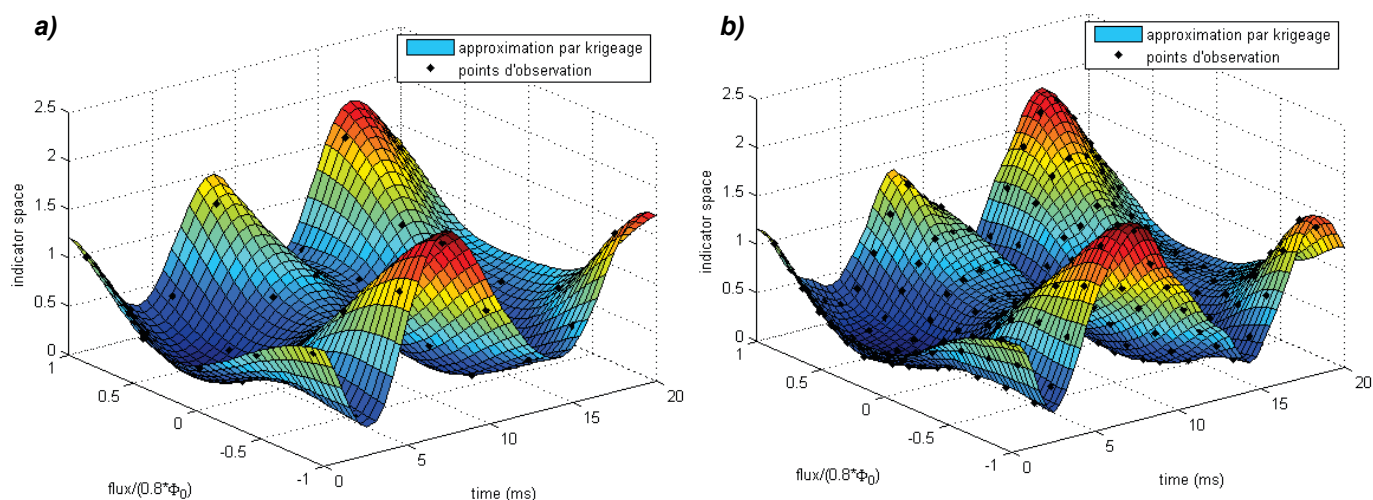
### C.1.4. Application à l'observation des indicateurs

Pour illustrer le contexte d'étude présenté au paragraphe 18.4, on analyse le comportement des indicateurs utilisés pour décrire les régimes transitoires des perturbations lors des enclenchements de départs. Cette analyse s'effectue en fonction de deux paramètres : l'instant d'enclenchement et la distribution du flux rémanent dans le noyau magnétique des transformateurs perturbateurs. L'étude de leurs variogrammes montre que leurs modèles de dépendance spatiale peuvent être estimés par des modèles gaussiens (Figure C-2).

Dans la suite de ce paragraphe, on illustre l'influence qu'ont le nombre de points d'observation et la structure de dépendance utilisée pour l'estimation du comportement des indicateurs dans l'espace de ces deux paramètres.

La Figure C-2 présente l'évaluation par *krigeage ordinaire* du comportement de l'indicateur présenté au paragraphe 18.3 (Figure 18-5). Cet indicateur renseigne sur l'intensité du courant d'appel apparaissant suite à l'enclenchement d'un départ. Le modèle du variogramme utilisé pour effectuer l'interpolation est gaussien dans les deux cas. Les deux interpolations sont réalisées à partir d'un maillage régulier de l'espace des données respectivement constitué de 30 et de 150 points. Si l'augmentation du nombre de points d'observation affine le comportement de l'indicateur (Figure C-2–b), l'interpolation déterminée à partir d'un nombre de points plus limité suffit à fournir une bonne approximation des positions des minima et maxima de l'indicateur (Figure C-2–a).

Dans les deux cas, l'estimation obtenue est satisfaisante (1% d'erreur pour 30 points contre 0.65% avec un maillage régulier de 150 points). Cette propriété permet de réduire le nombre de points à simuler et à traiter pour chaque configuration du réseau lors de la phase d'initialisation, c'est-à-dire avant le lancement de la stratégie d'échantillonnage commandée par la méthode d'optimisation EI.

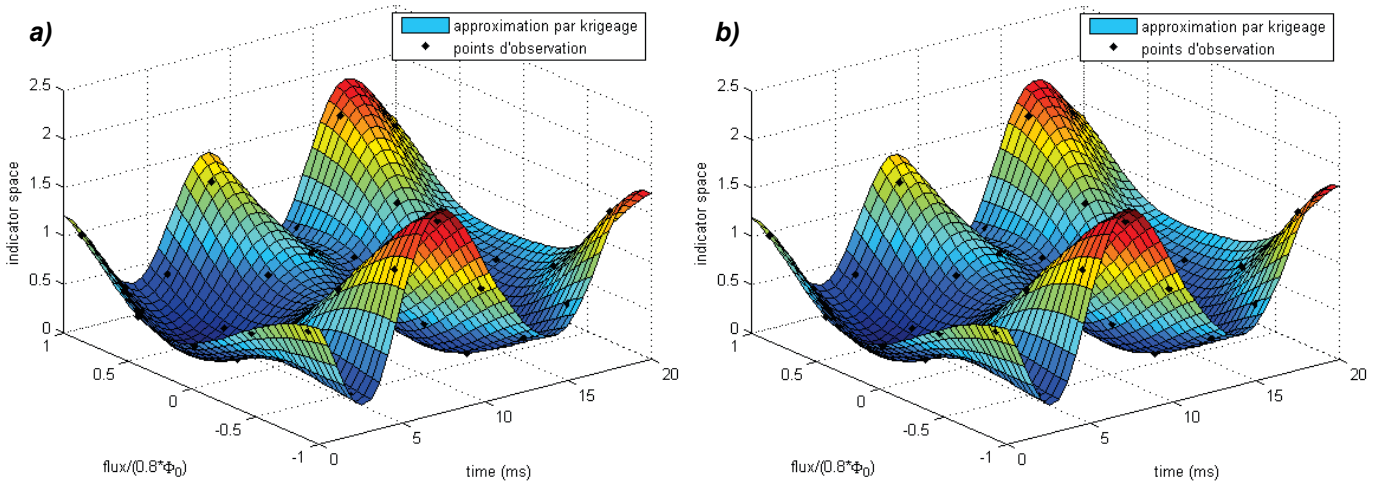


**Figure C-2 – Approximation par krigeage ordinaire du comportement de l'indicateur**

**(a) Approximation par krigeage sur 30 points**

**(b) Approximation par krigeage sur 150 points**

L'impact du choix du modèle de tendance a également été examiné. La Figure C-3 présente les résultats de l'interpolation du comportement de l'indicateur par deux modèles de tendance : le premier est constant (*krigeage ordinaire*) tandis que le second est linéaire (*krigeage universel*). Leur comparaison montre qu'avec 30 points d'observation, l'erreur d'estimation est proche de 1% dans les deux cas. Avec 150 points, un constat similaire est réalisé. La qualité de l'estimation n'est pas améliorée lorsqu'un degré de liberté supplémentaire est pris en compte. On parvient aux mêmes conclusions avec un modèle de tendance du second ordre [CAU10b]. Complexifier le modèle régressif de manière limitée ne présente donc pas d'intérêt pour notre application.



**Figure C-3 – Comparaison des interpolations par krigeage ordinaire et universel du comportement de l'indicateur**

- (a) Approximation par krigeage ordinaire sur 30 points (variogramme gaussien)
- (b) Approximation par krigeage universel sur 30 points (tendance linéaire & variogramme gaussien)

## C.2. Méthode d'optimisation « Expected Improvement »

La méthode « Expected Improvement » (EI) est une méthode d'optimisation itérative recherchant à minimiser une fonction objectif  $\xi(x)$  estimée en un nombre limité de points d'observation  $(\xi(x_1), \dots, \xi(x_n))$ . Elle s'appuie sur un critère, le critère EI qui quantifie l'amélioration potentielle d'une caractéristique associée à tout point de l'espace d'observation. Cette méthode est régulièrement utilisée lorsque l'évaluation de la fonction objectif présente un coût calculatoire trop important pour utiliser un maillage resserré de l'espace d'observation.

Cette méthode d'optimisation se base sur deux grandeurs :

- ✓ l'estimation du comportement de la fonction objectif  $\hat{\xi}(x)$ ,
- ✓ la variance de cette prédiction  $\hat{\sigma}^2(x)$ .

Dans ce manuscrit, elle permet de choisir les nouveaux points de l'espace d'observation à simuler.

### C.2.1. Présentation de la méthode EI

Afin d'améliorer l'estimation de la fonction objectif, la méthode EI procède en plusieurs étapes [BIL09, VAZ10] :

1. Elle recherche la plus faible valeur de la fonction objectif estimée par krigeage après traitement des simulations. Cette valeur est désignée par  $\xi_{min}$  (C-8).

$$\xi_{min} = \min_{k=1, \dots, n} \xi(x_k) \quad (C-8)$$



2. A l'aide de cette grandeur, on définit l'amélioration de l'estimation (ou « improvement ») pour tout point de l'espace d'observation à l'aide de la relation suivante :

$$I(x) = \max(0, \xi_{min} - \xi(x)) \quad (\text{C-9})$$

3. La fonction  $\xi(x)$  n'étant connue que pour les  $n$  points précédemment évalués, un critère différent, l'espérance d'amélioration (ou « expected improvement »), est employé. Comme  $\xi(x)$  est supposée être modélisée par un procédé aléatoire gaussien, ce critère se réécrit sous la forme suivante :

$$EI(x) = E(I(x)) = \hat{\sigma}(x)[u \Phi(u) + \varphi(u)] \quad (\text{C-10})$$

Où :  $u = (\xi_{min} - \hat{\xi}(x)) / \hat{\sigma}(x)$

$\varphi(.)$  est la fonction de probabilité normale

$\Phi(.)$  est sa fonction de répartition

4. Le point d'observation suivant est celui pour lequel le critère  $EI(x)$  prend la valeur maximale.

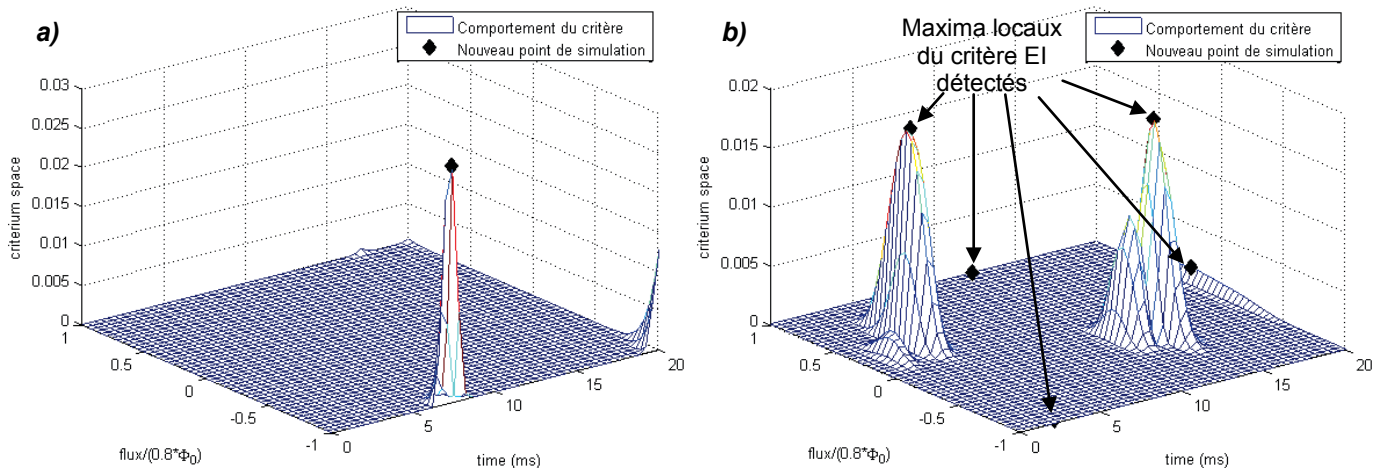
### C.2.2. Application à la commande des simulations paramétriques

La méthode EI est utilisée dans ce manuscrit pour rechercher les extrema de certains indicateurs de reconnaissance utilisés pour caractériser les régimes transitoires des perturbations. Elle se base sur l'interpolation par krigeage du comportement de l'indicateur  $\hat{Z}$  et sur sa variance. Son utilisation permet de limiter le nombre de simulations nécessaires à l'estimation suffisamment précise de ces extrema par rapport à une méthode employant un maillage équi-réparti.

L'application de la méthode EI suppose la définition d'un critère d'optimisation  $\xi(x)$  que l'on cherche à minimiser. Dans le cadre de notre étude, la fonction objectif est prise égale à la valeur de l'indicateur  $\xi(x) = Z(x)$  pour améliorer l'estimation de son maximum. Par contre, pour améliorer celle de son minimum, son opposé est considéré :  $\xi(x) = -Z(x)$ .

Les Figure C-4-a et -b présentent les valeurs des critères EI déterminées à partir de l'interpolation du comportement de l'indicateur de la Figure C-2-a (30 points d'observation) pour la recherche de ses maxima et minima. Les pics observés sur les deux critères correspondent aux nouveaux paramètres du réseau qui seront utilisés pour simuler la perturbation lors de l'itération suivante.

Pour l'exemple de la Figure C-4, l'estimation de la valeur maximale de l'indicateur par krigeage est de 2,09 contre 1,98 par analyse des données, soit une erreur de 5.6%. Après 11 boucles de simulations successives, l'erreur entre l'estimation de l'amplitude du maximum et celle déterminée à partir des données observées sur 3600 points est inférieure à 0.5%. Une vitesse de convergence similaire est également observée pour la recherche des minima.



**Figure C-4 – Comportement du critère EI pour l'indicateur de la Figure C-2–a**  
**Comportement du critère EI pour une recherche de maxima (a) et de minima (b)**

Par défaut, seul le maximum global du critère EI est recherché dans l'espace d'observation des données (Figure C-4–a). Ce maximum fournit un unique point de simulation pour chaque itération. Ainsi mise en œuvre, la méthode ne peut tirer partie des possibilités de parallélisme de l'outil de simulations paramétriques développé (Chapitre 18). Pour y remédier, on choisit de rechercher et d'utiliser les différents maxima locaux du critère EI (Figure C-4–b). Les points de l'espace d'observation simulés à chaque itération sont ceux qui contribuent le plus à améliorer l'évaluation de la fonction objectif.

L'emploi des maxima locaux du critère ne permet pas seulement d'exploiter l'architecture parallèle du logiciel de simulation développé. Il améliore également la vitesse de convergence du procédé.

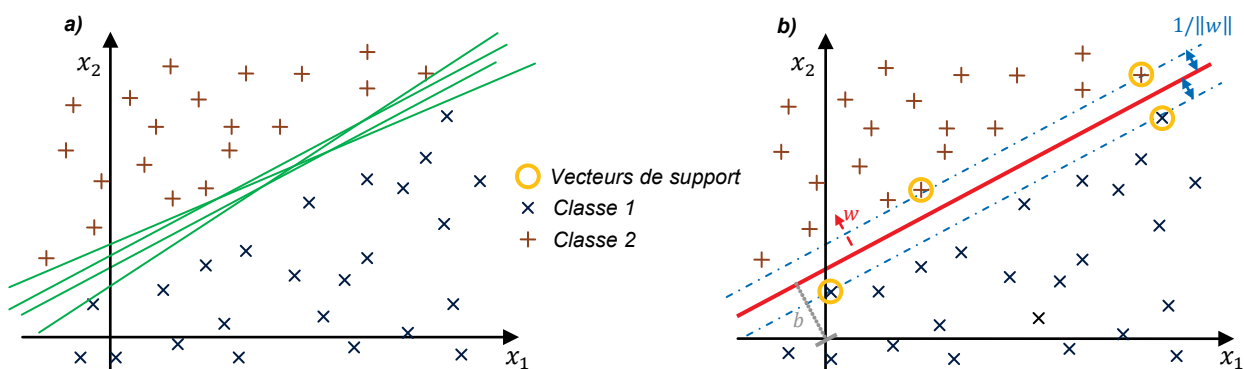
## Annexe D – Classifieurs SVM

Les Machines à Vecteurs de Support (en Anglais, Support Vector Machine, SVM), sont une généralisation des classifieurs linéaires. Cette technique d'apprentissage supervisé récente est employée pour des problèmes de discrimination de classes. Elle propose des performances équivalentes voire supérieures à des systèmes d'apprentissage par réseaux de neurones. Ces derniers présentent en effet un risque de sur-apprentissage important, car leur performance de généralisation est très variable et dépend fortement de la qualité, du nombre et de la répartition des événements employés lors de la phase d'apprentissage. Les SVM n'y sont pas sensibles et possèdent une bonne capacité de généralisation [JAI00, VAP98].

Afin de simplifier la présentation des SVM, on ne détaille que le cas où deux classes d'échantillons doivent être discriminées. Son principe est parfaitement généralisable à la discrimination multi-classe. Plusieurs méthodes traitant de cette problématique sont présentées au paragraphe D.4.

### D.1. Détermination de l'hyperplan de séparation optimal

L'une des idées fondatrices des SVM consiste à trouver le séparateur linéaire optimal permettant de discriminer deux classes de données. Dans le cas où le problème est linéairement séparable, il peut exister une infinité de séparateurs appropriés dont les performances sont équivalentes (Figure D-1-a). Les méthodes SVM définissent un hyperplan maximisant la marge entre les échantillons des deux classes d'événements les plus proches et l'hyperplan séparateur [BEN03, HSU03] (Figure D-1-b). Ce choix a une influence directe sur la capacité de généralisation du classifieur : elle augmente avec cette marge.



Soit un ensemble  $\mathcal{D}$  de  $n$  données d'apprentissage appartenant à deux classes distinctes (D-1). Si ces deux classes sont linéairement séparables, l'hyperplan optimal de paramètres  $\mathbf{w}$  et  $b$  vérifie la relation (D-2). Les échantillons des deux classes sont décrits dans un espace de  $p$  dimensions.

$$\mathcal{D} \in \{(x_i, y_i) | x_i \in \mathbb{R}^p, y_i \in \{-1, 1\}\}_{i=1}^n \quad (\text{D-1})$$

Où :  $y_i$  indique la classe d'appartenance (1 ou -1) pour chaque échantillon  $x_i$  de dimension  $p$ .

$$\min_i |\langle \mathbf{w}, x_i \rangle + b| = 1 \quad (\text{D-2})$$

Dans ces conditions, la recherche de l'hyperplan optimal correspond au problème de minimisation sous contraintes de  $\Phi(\mathbf{w})$  (D-3) [GUN98]. Il s'agit d'un simple problème quadratique pouvant être résolu par un système linéaire au moyen des multiplicateurs de Lagrange [IVA07]. Différentes méthodes de résolutions peuvent être utilisées pour résoudre ce type de problèmes de minimisation : les méthodes du gradient conjugué, du simplex...

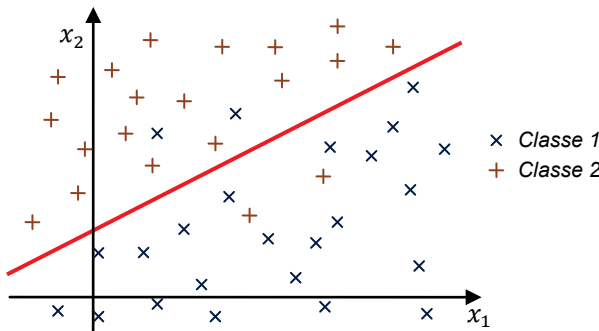
$$\Phi(\mathbf{w}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 \quad \text{tel que : } y_i(\langle \mathbf{w}, x_i \rangle - b) \geq 1, \forall i \in [1, n] \quad (\text{D-3})$$

## D.2. Extension aux problèmes linéairement non séparables

Le problème de minimisation précédent est uniquement valable en présence de données linéairement séparables. Or, une telle situation n'est pas valable dans le cas général. Il se peut, par exemple, que certains échantillons soient mal classifiés pour des raisons de bruits (Figure D-2). Pour en limiter l'impact, les SVM introduisent une *marge souple* qui tolère les erreurs de classifications [BEN03, GUN98]. L'hyperplan séparateur optimal recherché devient celui qui minimise le nombre d'erreurs. Pour ce faire, des *variables ressorts*  $\xi_i$  sont utilisées pour relâcher les contraintes sur les vecteurs d'apprentissage et une *fonction de pénalité*  $F(\xi)$  est introduite dans le problème de minimisation précédent (D-4).

$$\Phi(\mathbf{w}, \xi) = \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + C \sum_i \xi_i \quad \text{tel que : } y_i(\langle \mathbf{w}, x_i \rangle - b) \geq 1 - \xi_i, \forall i \in [1, n] \quad (\text{D-4})$$

$$F(\xi) = C \sum_i \xi_i, C > 0$$

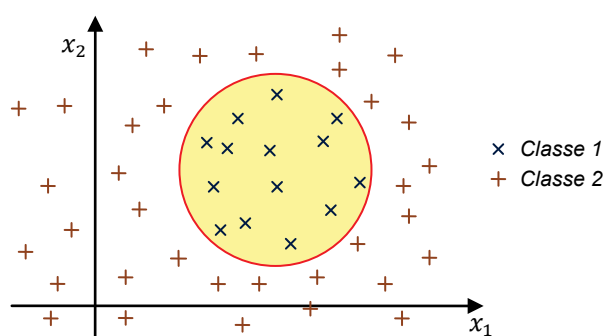


**Figure D-2 – Discrimination de données non linéairement séparables par un hyperplan optimal généralisé**

La constante  $C$  est choisie par l'utilisateur. Elle contrôle le compromis entre la largeur de la marge et le nombre d'erreurs de classement toléré. Il est généralement choisi après analyse des résultats fournis par des méthodes de validation-croisée [HSU03]. L'influence et la sélection de ce paramètre sont traitées dans le cadre de notre application au paragraphe 19.2 de ce manuscrit.

### D.3. Généralisation dans les espaces de grande dimension

La généralisation par *marge souple* n'apporte qu'une solution limitée au problème de classification. De nombreuses situations ne peuvent en effet être résolues par un classifieur linéairement séparable dans l'espace de description (Figure D-3).



**Figure D-3 – Discrimination de données non linéairement séparables par transformation de l'espace de description**

Pour y remédier, les SVM choisissent de projeter la base d'apprentissage dans un espace de description de dimension supérieure dans lequel il est plus probable qu'il existe des hyperplans séparateurs (Figure D-3). Cet espace est désigné par le terme d'*espace de redescription*.

La transformation de l'espace de représentation initial est réalisée par une *fonction noyau*  $K(x, y)$ , symétrique et définie positive. L'expression du nouveau problème de minimisation et celle de sa solution peuvent être trouvées dans [BUR98, IVA07].

Plusieurs types de fonctions noyaux sont utilisés. Les plus courants sont :

- ✓ Les noyaux gaussiens  $K(x, y) = \exp\left(-\frac{\|x - y\|^2}{2\sigma^2}\right)$
- ✓ Les noyaux polynomiaux  $K(x, y) = \langle x, y \rangle^d$  ou  $K(x, y) = (\langle x, y \rangle + 1)^d$

Les performances du classifieur SVM dépendent fortement du choix des paramètres des fonctions noyaux. Comme le paramètre  $C$  indiquant la tolérance sur les erreurs de classification, ils sont généralement déterminés par des méthodes de validation-croisée [GUN98, HSU03]

Les paramètres des fonctions noyaux ( $\sigma$  pour le noyau gaussien) et la constant de pénalisation  $C$  sont désignés dans ce manuscrit par le terme d'« *hyperparamètres* ».

Après apprentissage sur une base constituée de deux classes d'échantillons, la classification d'un nouvel échantillon  $x$  par SVM est déterminée par l'expression (D-5) [VAP98]. Seul un nombre limité d'échantillons simulés est ainsi utilisé pour la classification. Cela permet une prise de décision rapide.

$$f(x) = \text{sign} \left( \sum_{i \in VS} \alpha_i K(x_i, x) \right) \quad \text{Où : } \alpha_i \text{ sont les multiplicateurs de Lagrange} \quad \text{(D-5)}$$

déterminés lors de l'apprentissage  
 $VS$  est l'ensemble des vecteurs de support  
 identifiés lors de la phase d'apprentissage

## D.4. SVM et problèmes de discrimination multi-classes

Les méthodes de classification présentées aux paragraphes précédents sont valables uniquement lorsque deux classes doivent être dissociées. Différentes approches sont utilisées pour étendre leur domaine d'application aux problèmes multi-classes, c'est-à-dire quand  $M > 2$  classes d'échantillons distinctes sont présentes dans la base d'apprentissage. Dans ce paragraphe, plusieurs approches et modèles couramment utilisés pour la classification des problèmes multi-classes sont présentés.

### Approche « un contre tous » ou « One-versus-all »

Cette approche consiste à construire  $N$  classifieurs binaires indépendants. Chacun de ces classifieurs compare les échantillons d'une classe  $i$  à ceux des  $N-1$  autres classes pendant la phase d'apprentissage. Lors de la phase de classification, une valeur de confiance (marge) est déterminée pour chaque classifieur. La classe ayant la marge la plus élevée remporte le vote [SCH95, RIF04].

### Approche « un contre un » ou « One-versus-one »

Cette seconde approche consiste à construire  $N(N-1)/2$  classifieurs binaires indépendants. Pendant la phase d'apprentissage, chacun de ces classifieurs compare les échantillons d'une classe  $i$  à ceux d'une classe  $j$  distincte. Lors de la phase de classification, une valeur de confiance (marge) est déterminée pour chaque classifieur. La classe déterminée par cette méthode ressort majoritaire des  $N(N-1)/2$  classifieurs binaires [HAS98, FUR02].

Cette approche repose sur l'hypothèse selon laquelle la frontière séparant deux classes est moins complexe que celle la séparant de toutes les autres. Par rapport à l'approche un contre tous, les estimateurs obtenus présentent généralement un biais plus faible. Ils ont par contre une variance accrue puisque la base d'apprentissage de chaque classifieur est plus petite que la base d'apprentissage prise dans sa globalité. Les bonnes performances des méthodes « un contre un » ont des raisons pratiques : les indicateurs utilisés lors du problème d'apprentissage sont généralement établis en cherchant à rendre les classes les plus séparables possibles [GUE07].

Ces deux approches sont utilisées dans plusieurs systèmes de reconnaissance d'événements électrotechniques [BOL07, EK109, LIN08]. Des méthodes hybrides sont également utilisées [AXE07].

### **Utilisation de codes correcteurs d'erreurs**

Une approche alternative consiste à utiliser des codes correcteurs d'erreurs (ECOC). Chaque classe du problème de discrimination est représentée par des « mots codes » binaires de même taille  $T$ . Ces  $Q$  classes sont rassemblées en une matrice  $M = (m_{kl})$ , où  $m_{kl} \in \{0,1\}$ . Ses lignes  $(M_k)_{1 \leq k \leq Q}$  sont les « mots codes » et ses colonnes  $(M_l)_{1 \leq l \leq T}$  spécifient  $T$  dichotomies (partition en deux « super-classes » de l'ensemble des classes). Chaque dichotomie est calculée par un classifieur SVM.

Lors de la phase de test, les  $T$  classifieurs renvoient un vecteur  $\{0,1\}^T$ . La classe correspondante est celle dont le mot code est le plus proche de ce vecteur au sens de la distance de Hamming [DIE95].

### **SVM Multi-Classes : M-SVM, M-SVM<sup>2</sup> et LS-SVM**

Contrairement aux méthodes reposant sur les réseaux de neurones, l'extension du champ d'applications des méthodes SVM en dehors du champ « bi-classes » est moins naturelle. Plusieurs méthodes ont été développées au cours des dix dernières années. Elles sont conçues comme des extensions du problème bi-classes. Plusieurs modèles de M-SVM ont été développés à cet effet : les modèles de Weston et Watkins [WES99], de Crammer et Singer [CRA01] et de Lee [LEE02] sont les trois principales variantes.

Il existe également d'autres modèles dérivés tels que la M-SVM<sup>2</sup> ou la LS-SVM qui utilisent le carré de la norme euclidienne des variables ressorts  $\xi_i$  au lieu de la norme euclidienne simple comme contribution empirique à la fonction objectif (D-6) [SUY99].

$$\boxed{\Phi(\mathbf{w}, \xi) = \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + C \sum_i \xi_i^2} \quad (\text{D-6})$$

Les deux derniers types de méthodes sont encore peu répandus dans le domaine de l'analyse des perturbations affectant les réseaux électriques [ZHA10]. Ceci s'explique peut-être, car leurs performances pour ce type d'applications ne sont pas très différentes des méthodes combinatoires précédentes alors que leur mise en œuvre est plus complexe [GUE07].

## Références bibliographiques

- [ADB04] T.K. Abdel-Galil, M. Kamel, A.M. Youssef, E.F. El-Saadany, M.M.A. Salama, *Power Quality Disturbance Classification using the Inductive Inference Approach*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.19, N°4, 2004
- [ALL97] I. Allouche, *Classification et Caractérisation des défauts monophasés sur les réseaux de distribution HTA*, Phd, 1997.
- [AXE07] P.G.V. Axelberg, I.Y.H. Gu, M.H.J. Bollen, *Support Vector Machine for Classification of Voltage Disturbances*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.22, N°3, July 2007
- [BAI05] S. Baillargeon, *Le Krigeage : revue de la théorie et application à l'interpolation spatiale de données de précipitations*, 2005.
- [BEL95] M. Belkhat, J. Edwards, N. Hoonchareon, O. Marte, D. Stenberg, E. Walters, *Transients in Power Systems*, Electrical and Computer Engineering, ECE Technical Reports, Purdue Libraries, 1995
- [BEG93] M.M. Begovic, P.M. Djuric, S. Dunlap, A.G. Phadke, *Frequency Tracking in Power Networks in the Presence of Harmonics*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.8, N°2, July 1993.
- [BEN03] K.P. Bennett, C. Campbell, *Support Vector Machines: Hype or Hallelujah?*, SIGKDD Explorations, 2000.
- [BER95] L. Berthet, V. Leitloff, D. Griffel, *Paramètres fondamentaux des réseaux de distribution d'énergie électrique à neutre mis à la terre par bobine de compensation*, HR-44/95/087.
- [BER98] L. Berthet, *Comportement des Réseaux Compensés HTA en Présence d'un Défaut Monophasé*, HR-45/98/022/A, Avril 1998.
- [BIL09] S. Bilicz, E. Vazquez, J. Pavo, M. Lambert, S. Gyimothy, *Eddy-current testing with the Expected Improvement optimization algorithm*, ENDE'09, 2009
- [BOL95] M.H.J. Bollen, *The Influence of Motor Reacceleration on Voltage Sags*, IEEE Transactions on Industry Applications, July 1995.
- [BO404] M.H.J. Bollen, P. Goossens, A. Robert, *Assessment of Voltage Dips in HV-Networks: Deduction of Complex Voltages From the Measured RMS Voltages*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.19, N°2, April 2004.
- [BO703] M.H.J. Bollen, *Algorithms for Characterizing Measured Three-Phase Unbalanced Voltage Dips*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, N°3, July 2003.
- [BOL99] M.H.J. Bollen, *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruption*, Wiley – IEEE Press, 1999.
- [BOL06] M.H.J. Bollen, I.Y.H. Gu, *Signal Processing of Power Quality Disturbances*, Wiley&Sons
- [BOL07] M.H.J. Bollen, I.Y.H. Gu, P.G.V. Axelberg, E. Styvaktavis, *Classification of Underlying Causes of Power Quality Disturbances: Deterministic versus Statistical Methods*, EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2007
- [BUR98] C.J.C. Burges, *A Tutorial on Support Vector Machines for Pattern Recognition*, Journal Data Mining and Knowledge Discovery, Volume 2 Issue 2, June 1998
- [CAR88] E. Cardozo, S. N. Ralukdar, *A Distributed Expert System for Fault Diagnosis*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.3, N°2, 1988



## Références bibliographiques

---

- [CAU09] M. Caujolle, *Analyse Critique des Méthodes de Décomposition, Reconnaissance et Direction des Perturbations affectant les Réseaux HTA*, HRXXXXX, Novembre 2009
- [CAU10a] M. Caujolle, M. Petit, G. Fleury, L. Berthet, *Reliable Power Disturbance Detection using Wavelet Decomposition or Harmonic Model based Kalman Filtering*, ICHQP'10, 2010
- [CAU10b] M. Caujolle, *Etude et validation paramétrique de la reconnaissance des perturbations*, HRXXXXX, Novembre 2010
- [CAU11a] M. Caujolle, M. Petit, G. Fleury, L. Berthet, *Impact of Segmentation Accuracy on Disturbance Recognition Reliability*, IPST'11, 2011
- [CAU11b] M. Caujolle, M. Petit, G. Fleury, L. Berthet, *Accurate Segmentation of Power Quality Disturbances – Part 1: Comparative Study of Segmentation Indices*, IEEE Trans. on Power Delivery, July 2011
- [CAU11c] M. Caujolle, M. Petit, G. Fleury, L. Berthet, *Accurate Segmentation of Power Quality Disturbances – Part 2: Adaptive Segmentation Process*, IEEE Trans. on Power Delivery, July 2011
- [CHA95] O. Chaari, *Ondelettes et analyse de prony. Application aux courts-circuits*, Phd, 1995.
- [CHA04] P. Chazal, M.O. Dwyer, R.B. Reilly, *Automatic Classification of Heartbeats using ECG Morphology and Heartbeat Interval Features*, IEEE Transaction on Biomedical Engineering, Vol.51, N°7, July 2004
- [CHO97] H.-J. Cho, J.-K. Park, *An Expert System for Fault Section Diagnosis of Power Systems using Fuzzy Relations*, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 12, N°1, 1997.
- [CHU99] J. Chung, E.J. Powers, W.M. Grady, S.C. Bhatt, *New robust voltage sag disturbance detector using and adaptive prediction error filter*, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 1999
- [CEL09] A. Celisse, *Model selection via cross-validation in density estimation, regression and change-points detection*, PhD, Université Paris Sud, Décembre 2009
- [CRA01] K; Crammer, Y. Singer, *On the Algorithmic Implementation of Multi-Class Kernel-based Vector Machine*, Journal of Learning Machine, Vol.2, pp.265-292, 2001
- [DAF02] C.J. Dafis, A. Petropulu, *Harmonic decomposition of transient disturbances using ls prony and esprit -based methods*, PSCC, 2002
- [DAS96] P.K. Dash, A.C. Liew, *An adaptive linear combiner for on-line tracking of power system harmonics*, IEEE Transaction on Power Systems, Vol.11, N°4, November 1996
- [DAS98] P.K. Dash, A.C. Liew, D.P. Swain, B. Mishra, *Fast Tracking of Transient Power System Signals using Fuzzy LMS Algorithm*, Electrical Power & Energy Systems, Vol.20, N°8, 1998
- [DAS99c] P.K. Dash, *Frequency Estimation of Distorted Power System Signals using Extended Kalman Filter*, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 14, N°3, July 1999.
- [DAS00] P.K. Dash, S. Mishra, M.A. Salama, A.C. Liew, *Classification of Power System Disturbances using a Fuzzy Expert System and a Fourier Linear Combiner*, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 15, N°2, April 2000
- [DAS03] P.K. Dash, B.K. Panigrahi, G. Panda, *Power Quality Analysis Using S–Transform*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.18, N°2, October 2003
- [DIE95] T.G. Dietterich, G. Bakiri, *Solving multiclass learning problems via error-correcting output codes*, Journal of Artificial Intelligence Research, Vol.2, pp.263-286, 1995
- [DUG04] R.C Dugan, M.F. McGranaghan, S. Santoso, H.W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, 2<sup>nd</sup> Edition, McGraw-Hill, 2004
- [DUQ05] C.A. Duque, M.V. Ribeiro, F.R. Ramos, J.Szczupak, *Power Quality Event Detection Based on the Divide and Conquer Principle and Innovation Concept*, IEEE Transactions on Power Delivery, October 2005

## Références bibliographiques

---

- [EDF87] CETE, *Condensateurs MT et appareillage Annexe*, Guide Technique de la Distribution d'Électricité, mai 1987.
- [EDF89] J. Saint, *Système expert d'aide à l'auscultation des réseaux MT – Interprétation des informations analogiques et logiques permettant une « expertise » d'un départ*, HR-45/910.FB, 1989.
- [EDF94a] STE d'EDF GDF Services, *Plan de protection des réseaux HTA–B.61-21 Principes*, EDF 1994
- [EDF94b] STE d'EDF GDF Services, *Plan de protection des réseaux HTA–B.61-24 Electrotechnique de réseau*, EDF 1994
- [EKI09] S. Ekici, *Classification of Power System Disturbances using Support Vector Machines*, Expert Systems with Applications, Volume 36, pp. 9859-9868, 2009
- [FAR07] L.B. Farr, T.A. Farr, *Considerations in Medium Voltage Reduced Voltage Motor Starting the Good, the Bad and the Ugly*, Petroleum and Chemical Industry Technical Conference 2007
- [FER95] Philippe Ferracci, *Etude des régimes transitoires à l'établissement d'un défaut monophasé sur réseau d'énergie triphasé moyenne tension à neutre compensé*, PhD, Juillet 95.
- [FLE01] G. Fleury, *Analyse Spectrale – Méthodes Non-Paramétriques et Paramétriques*, Editions Ellipses, 2001.
- [FLO03] R.A. Flores, I.Y.H. Gu, M.H.J. Bollen, *Positive and Negative Sequence Estimation for Unbalanced Voltage Dips*, Power Engineering Society Meeting, IEEE, 2003.
- [FUR02] J. Fürnkranz, *Round robin classification*, Journal of Machine Learning Research, Vol.2 pp.721-747, 2002
- [GAO99] A.M. Gaouda, M.M.A. Salama, M.K. Sultan, *Power Quality Detection and Classification Using Wavelet-Multiresolution Signal Decomposition*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.14, N°4, October 1999.
- [GAR01] S. Garcia, A. Medina, *A State Space Three-Phase Multi-Limb Transformer Model in the Time Domain: Fast Periodic Steady State Analysis*, IEEE, 2001.
- [GIR92] A.A. Girgis, G.G. Hart, W.L. Peterson, *A new fault location technique for two- and three-terminal lines*, Vol.7, N°1, IEEE Transactions on Power Delivery, January 1992
- [GHO95] A.K. Ghosh, D.L. Lubkeman, *The Classification of Power System Disturbance Waveforms using a Neural Network Approach*, Vol.10, N°1, IEEE Transactions on Power Delivery, January 1995
- [GRA06] L. Grady, *Random Walks for Image Segmentation*, IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.28, N°11, November 2006
- [GU00a] I.Y.H. Gu, M.H.J. Bollen, E. Styvaktakis, *The Use of Time-Varying AR Models for the Characterization of Voltage Disturbances*, Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE, 2000.
- [GU00b] I.Y.H. Gu, M.H.J. Bollen, *Time-Frequency and Time-Scale Domain Analysis of Voltage Disturbances*, IEEE Transactions On Power Delivery, Vol.15, N°4, October 2000.
- [GU03] I.Y.H. Gu, E. Styvaktakis, *Bridge the gap: signal processing for power quality applications*, Electric Power Systems Research, 2003.
- [GU04] I.Y.H. Gu, N. Ernberg, E. Styvaktakis, *A Statistical-Based Sequential Method for Fast Online Detection of Fault-Induced Voltage Dips*, IEEE Transactions On Power Delivery, Vol.19, N°2, April 2004.
- [GU08] I.Y.H. Gu, M.H.J. Bollen, *Estimating Interharmonics by Using Sliding-Window ESPRIT*, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.23, N°1, January 2008
- [GUE07] Y. Guermeur, *SVM Multiclasses, Théorie et Applications*, Mémoire d'HDR, 2007

## Références bibliographiques

---

- [GUN98] S. Gunn, *Support Vector Machines for Classification and Regression*, Technical Report, University of Southampton, 1998
- [HAM04] N. Hamzah, A. Mohamed, A. Hussain, *A new Approach to Locate the Voltage Sag Source Using Real Current Component*, Electric Power Systems Research, 2004
- [HAS98] T. Hastie, R. Tibshirani, *Classification by pairwise coupling*, The Annals of Statistics, Vol.26, N°2, pp.451-471, 1998.
- [HEA98] M.J. Heathcote, *The J&P Transformer Book*, 12<sup>th</sup> Edition, Newnes, 1998
- [HSU03] C.W. Hsu, C.C Chang, C.J. Lin, *A Practical Guide to Support Vector Classification*, Technical Report, Department of Computer Science, National Taiwan University
- [HUR08] K.Hur, S.Santoso, *On two Fundamental Signatures for determining the Relative Location of Switched Capacitor Banks*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.23, N°2, April 2008.
- [HYD01] Hydro-Québec, *Caractéristiques et cibles de qualité de la tension fournie par les réseaux moyenne et basse tension*, Rapport 30012-01-02, Février 2001
- [IEC430] IEC 61000-4-30 – Testing and measurement techniques – Power Quality measurement methods, International Standard
- [IGN06] Vanya Ignatova, *Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique. Application aux creux de tension et à la pollution harmonique*. Thèse CNRS, Octobre 2006.
- [IVA07] O. Ivanciuc, *Applications of Support Vector Machines in Chemistry*, Reviews in Computational Chemistry, Volume 23, Chapter 6, February 2007
- [JAI00] A.K. Jain, R.P.W. Duin, *Statistical Pattern Recognition: A Review*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 22, N°1, January 2000
- [JOH95] B. Johnson, A.J.Schultz, N.R.Schultz, R.B.Shores, *Some Fundamentals on Capacitance Switching*, AIEE, 1995
- [KAL60] R.E. Kalman, *A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems*, Transaction of the ASME, Journal of Basic Engineering, N°82, pp. 35-45
- [KAY88] S.M. Kay, *Modern Spectral Estimation: Theory and Application*, Prentice Hall, 1988.
- [KEU07] H.De Keulenaer, *Transient and Temporary Overvoltages and Currents*, Leonardo Energy, 2007
- [KEZ93] M. Kezunovic, C.W. Fromen, *An Expert System for Transmission Substation Event Analysis*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.8, N°4, 1993
- [KIE08] U. Kiencke, M. Schwarz, T. Weickert, *Signalverarbeitung – Zeit-Frequenz Analyse und Schätzverfahren*, Oldenbourg, 2008.
- [KOC97] D. Koch, *Cahier technique 189 – Manœuvre et protection des batteries de condensateurs MT*, Collection Technique, Schneider Electric, 1997
- [KUL04] S.V. Kulkarni, S.A. Khaparde, *Transformer Engineering – Design and Practice*, Dekker, 2004
- [LAI99] L.L. Lai, W.L. Chan, C.T. Tse, A.T.P. So, *Real-Time Frequency and Harmonic Evaluation using Artificial Neural Networks*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.14, N°1, 1999.
- [LE10] C.D. Le, I.Y.H. Gu, M.H.J. Bollen, *Joint causal and anti-causal segmentation and location of transitions in power disturbances*, IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2010
- [LE11] C.D. Le, *Towards Intelligent Power-System Monitoring: Segmentation, Feature Extraction, and Identification of Underlying Causes*, Licentiate Thesis, 2011
- [LEE02] Y. Lee, *Multicategory Support Vector Machines: Theory and Application to the Classification of Micorarray Data and Satellite Radiance Data*, Technical Report, 2002

## Références bibliographiques

---

- [LEE03] I.W.C. Lee, P.K. Dash, *S-transform-based intelligent system for classification of power quality disturbance signals*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.50, N°4, 2003.
- [LI03] C. Li, T. Tayjasanant, W. Xu, X. Liu, *Method for voltage-sag source detection by investigating slope of the system trajectory*, IEEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, May 2003.
- [LIN08] W.-L. Min, C.-H. Wu, C.-H. Lin, H.-S. Cheng, *Detection and Classification of Multiple power-Quality Disturbances with Wavelet Multiclass SVM*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.23, N°4, 2008
- [LOB97] Y. Lobos, J. Rezmer, *Real-Time Determination of Power System Frequency*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol.46, N°4, 1997.
- [LOP02] S. Lophavec, H. B. Nielsen, J. Sondergaard, *DACE – A Matlab Kriging Toolbox*, 2002
- [NAJ09] H. Najmeddine, *Méthode d'identification et de classification de la consommation d'énergie par usages en vue de l'intégration dans un compteur d'énergie électrique*, PhD, 2009
- [NAT05] R. Natarajan, *Power System Capacitors*, Taylor&Francis, 2005.
- [PAR99] A.C.Parson, W.M.Grady, E.J.Powers, J.C.Soward, *Rules for Locating the Sources of Capacitor Switching Disturbances*, IEEE, 1999
- [PAR00] A.C.Parson, W.M.Grady, E.J.Powers, J.C.Soward, *A Direction Finder for Power Quality Disturbances Based Upon Disturbance Power and Energy*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, N°3, July 2000.
- [PEL98] B.L. Pellom, J.H.L. Hansen, *Automatic Segmentation of Speech Recorded in Unknown Noisy Channel Characteristics*, Speech Communication, Vol. 25, pp. 97-116, August 1998
- [PER06a] E. Pérez, J. Barros, *Voltage Event Detection and Characterization Methods: A Comparative Study*, IEEE PES Transmission and Distribution Conference, 2006
- [PER06b] E. Pérez, J. Barros, *Automatic Detection and Analysis of Voltage Events in Power Systems*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 55, N°5, Oct. 2006
- [POI00] O. Poisson, P. Rioual, M. Meunier, *Detection and Measurement of Power Quality Disturbances Using Wavelet Transform*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, N°3, July 2000
- [REA07] M.B.I. Reaz, F. Choong, M.S.Sulaiman, F. Mohd-Yasin, *Expert System for Power Quality Disturbance Classifier*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.22, N°3, 1997
- [REF09] P. Refaeilzadeh, L. Tang, H. Liu, *Cross-Validation*, Encyclopedia of Database Systems, Springer, pp. 532-538, 2009
- [RES97] F.G.V. Resende, P.S.R. Diniz, M. Kaneko, A. Nishihara, *Adaptive AR spectral estimation based on multi-band decomposition of the linear prediction error with variable forgetting factors*, ICASSP 97
- [RIF04] R. Rifkin, A. Klautau, *In defense of one-vs-all classification*, Journal of Machine Learning Research, Vol.5, pp.101-141, 2004
- [RIO00] M. Rioual, C. Sicre, *Energization of a no-load transformer for power restoration purposes: Impact of the sensitivity to parameters*, IPST 2000.
- [RIO09] M. Rioual, J-C Reveret, *Energization of step-up transformers for wind-farms : modeling and its validation by tests performed on a 10 MW site*, IPST 2009
- [SAI04] M.M. Saied, *Capacitor Switching Transients: Analysis and Proposed Technique for Identifying Capacitor Size and Location*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, N°2, April 2004.
- [SAN00a] S. Santoso., E. J. Powers, W. M. Grady, *Power Quality Disturbance Waveform Recognition Using Wavelet-Based Neural Classifier*, Vol. 15, No. 1, January 2000

## Références bibliographiques

---

- [SAN00c] S. Santoso., W. M. Grady, E. J. Powers, *Characterization of Distribution Power Quality Events with Fourier and Wavelet Transforms*, IEEE Transactions On Power Delivery, Vol.15, N°1, January 2000
- [SAR97] W. S. Sarle. *Neural Network FAQ*, 1997. <ftp://ftp.sas.com/pub/neural/FAQ.html>, Periodic posting to the Usenet newsgroup comp.ai.neural-nets.
- [SCH95] B. Schölkopf, C. Burges, V. Vapnik, *Extracting support data for a given task*, KDD'95, pp.252-257, 1995
- [SHI99] Y.-J.Shin, E.J.Powers, W.M.Grady, *Time-frequency analysis of power system disturbance signals for power quality*, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 1999.
- [SHI08] Y.-J.Shin, E.J.Powers, W.M.Grady, A.Arapostathis, *Signal Processing-Based Direction Finder for Transient Capacitor Switching Disturbances*, Vol. 23, N°4, IEEE Transactions on Power Delivery, October 2008
- [STY02a] E. Styvaktavis, *Automating Power Quality Analysis*, PhD, 2002.
- [STY02b] E. Styvaktakis, M.H.J. Bollen, *Automatic Classification of Power System Events using RMS Voltage Measurements*, IEEE, 2002
- [STY03] E. Styvaktakis, I. Gu , M.H.J. Bollen, *Event-based Transient Categorization and Analysis in Electric Power Systems*, Systems, Man and Cybernetics, IEEE Conference, 2003
- [SUY99] J. Suykens, J. Vandewalle, *Multi-class Least Squares Support Vector Machines*, IJCNN'99, 1999
- [TER94] V.V. Terzija, M.B. Djuric, B.D Kovacevic, *Voltage phasor and local system frequency estimation using Newton type algorithm*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.9, N°3, July 1994
- [THO01] D.W.P. Thomas, M.S. Woolfson, *Evaluation of Frequency Tracking Methods*, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.16, N°3, July 2001
- [VAP98] V.N. Vapnik, *Statistical Learning Theory*, John Wiley & Sons, New-York, 1998.
- [VAZ10] E. Vazquez, J. Bect, *Convergence properties of the expected improvement algorithm with fixed mean and covariances functions*, Journal of Statistical Planning and Inference, 2010
- [WAN03] M. Wang, Y. Sun, *A Practical, Precise Method for Frequency Tracking and Phasor Estimation*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.19, N°4, October 2004
- [WAN04] F. Wang, M.H.J. Bollen, *Frequency-Response Characteristics and Error Estimation in RMS Measurement*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.19, N°4, October 2004
- [WAT02] N. Watson, J. Arrillaga, *Power Systems Electromagnetic Transients Simulation*, IET, 2002
- [WES99] J. Weston, C. Watkins, *Support Vector Machines for Multi-Class Pattern Recognition*, ESANN'99, pp. 219-224, 1999
- [ZHA10] M. Shang, K. Li, Y. Hu, *Classification of Power Quality Disturbances Using Wavelet Packet Energy Entropy and LS-SVM*, Journal of Energy and Power Engineering, Vol. 2, 2010
- [ZHU04] T.X. Zhu, S.K. Tso, K.L. Lo, *Wavelet-Based Fuzzy Reasoning Approach to Power-Quality Disturbance Recognition*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.19, N°4, 2004.

## Liste des figures

Figure 1-1 – Problématique de reconnaissance des perturbations.....	16
Figure 2-1 – Architecture d'un réseau de distribution HTA rural .....	17
Figure 2-2 – Régimes de mise à la terre du neutre pour un réseau impédant et compensé.....	18
Figure 2-3 – Cycle de fonctionnement typique des protections suite à l'apparition d'un défaut polyphasé sur un départ en aval du jeu de barres sur un réseau impédant .....	20
Figure 2-4 – Classification des perturbations apparaissant sur les réseaux de distribution .....	21
Figure 2-5 – Représentation schématique des points de mesure considérés sur le réseau de distribution HTA pour l'analyse des perturbations .....	22
Figure 2-6 – Mesures des valeurs efficaces des tensions simples en présence d'un défaut monophasé sur un réseau à neutre impédant (a) et un réseau compensé (b).....	23
Figure 2-7 – Déformation de l'onde de courant par la courbe de saturation magnétique du transformateur (hystérésis négligée) .....	24
Figure 2-8 – Comportement des valeurs efficaces [des tensions (a) et des courants (b)] au jeu de barres du poste source lors du réenclenchement d'un départ .....	25
Figure 2-9 – Forme d'onde des tensions et des courants au jeu de barres du poste source suite à l'enclenchement d'un gradin de condensateurs au poste .....	26
Figure 2-10 – Schéma monophasé équivalent présentant les principaux paramètres conditionnant les perturbations d'enclenchements d'un gradin observé du jeu de barres du poste HTB-HTA.....	27
Figure 3-1 – Architecture classique des systèmes de reconnaissance .....	28
Figure 3-2 – Comparaison des pavages les plus courants de l'espace temps-fréquence .....	30
Figure 3-3 – Schéma d'analyse d'un signal par MRA .....	32
Figure 3-4 – Observation d'un enclenchement de batterie de condensateurs .....	33
Figure 3-5 – Traitement des perturbations par les deux familles de méthodes de décomposition .....	36
Figure 3-6 – Segmentations obtenues après l'analyse indépendante des formes d'onde des trois tensions .....	38
Figure 3-7 – Schéma simplifié d'un système de reconnaissance expert .....	40
Figure 3-8 – Schéma générique d'apprentissage des méthodes à apprentissage supervisé .....	41
Figure 3-9 – Principe de séparation de deux classes $C1$ et $C2$ par la méthode SVM [BOL07] .....	41
Figure 4-1 – Architecture du système de reconnaissance des perturbations .....	43
Figure 6-1 – Décomposition d'un creux de tension selon ses régimes de fonctionnement permanents et transitoires.....	51
Figure 6-2 – Architecture du procédé d'identification des régimes de fonctionnement .....	56
Figure 7-1 – Comportement de la valeur RMS d'un signal à 49 Hz pour une fenêtre synchrone (adaptée à $f_0 = 49$ Hz) et une fenêtre non synchrone (adaptée à $f_0 = 50$ Hz) .....	60

## Liste des figures

---

Figure 7-2 – Découpage de l'espace fréquentiel par deux filtres anti-harmoniques.....	63
Figure 7-3 – Comportement des filtres anti-harmoniques lors d'un enclenchement de départ.....	64
Figure 7-4 – Extraction des transitoires d'un défaut biphasé isolé.....	64
Figure 7-5 – Extraction du transitoire d'enclenchement de batterie de compensation.....	65
Figure 7-6 – Extraction du signal de TCFM de la forme d'onde d'une tension mesurée sur le réseau HTA.....	65
Figure 7-7 – Erreur introduite par la désynchronisation sur la fréquence fondamentale.....	67
Figure 7-8 – Illustration du procédé d'interpolation linéaire de la valeur retardée du signal.....	68
Figure 7-9 – Comportement de l'erreur de filtrage anti-harmoniques dans le cadre d'un filtre numérique direct (b) et de filtres avec corrections linéaire (c) et cubique (d) dans une situation de désynchronisation maximale entre le fondamental et l'échantillonnage.....	69
Figure 7-10 – Impact des composantes harmoniques intégrées au modèle sur l'erreur d'estimation par un filtre de Kalman dont le ratio des covariances est pris égal à 10.....	71
Figure 7-11 – Impact du ratio $r_1$ des covariances $W_1$ et $V_1$ sur l'erreur d'estimation du filtre de Kalman avec un modèle comportant le fondamental et les composantes harmoniques 3, 5 et 7.....	72
Figure 7-12 – Extraction des transitoires d'un défaut biphasé isolé.....	72
Figure 7-13 – Extraction du transitoire d'enclenchement de batterie de compensation.....	73
Figure 7-14 – Extraction du signal de TCFM de la forme d'onde d'une tension mesurée sur le réseau HTA.....	73
Figure 7-15 – Comportement de l'erreur de filtrage de Kalman <sub>1357</sub> dans une situation de désynchronisation maximale entre le fondamental et l'échantillonnage.....	74
Figure 7-16 – Comportement des indices de segmentation calculés par les filtres de Kalman et anti-harmoniques pour des transitoires de dynamiques différentes.....	77
Figure 7-17 – Indices de segmentation pour différentes fenêtres d'intégration.....	79
Figure 7-18 – Sensibilité des filtrages anti-harmoniques et de Kalman aux signaux de TCFM.....	80
Figure 8-1 – Variation du niveau de régime permanent suite à l'apparition d'un défaut.....	84
Figure 8-2 – Détection de transitoires proches par un seuillage statique.....	84
Figure 8-3 – Illustration des étapes de normalisation du support et de calcul de sa moyenne.....	86
Figure 8-4 – Illustration de l'étape de détermination des seuils adaptatifs.....	87
Figure 8-5 – Décomposition de la forme d'onde en régimes permanents et transitoires.....	88
Figure 9-1 – Distribution du retard de détection. Deux indices de segmentation calculés par un T0-AHF et par un WFB de type Coiflet <sub>3</sub> sont analysés par l'algorithme de détection.....	90
Figure 9-2 – Comparaison des distributions des retards avant (« raw ») et après correction du retard moyen (« statistical »).....	92
Figure 9-3 – Résultat de la compensation par la méthode de correction statistique.....	92
Figure 9-4 – Principe de la méthode de compensation exploitant les points d'inversion de la pente de l'indice de segmentation (1 <sup>er</sup> transitoire de la perturbation de la Figure 6-1).....	93
Figure 9-5 – Pente de l'indice de segmentation et localisation des instants de début et de fin du	

---

## Liste des figures

---

transitoire à partir de ses points d'inversion .....	94
Figure 9-6 – Comparaison des distributions des retards avant (« raw ») et après l'analyse des points d'inversion (« slope inversion ») .....	95
Figure 9-7 – Résultat de la compensation par la méthode d'analyse des points d'inflexion .....	95
Figure 9-8 – Décomposition des formes d'onde et profil de segmentation.....	96
Figure 9-9 – Addition de trois profils de segmentation et segmentation unifiée résultante .....	97
Figure 9-10 – Schéma du système de fusion des segmentations.....	98
Figure 10-1 – Exemple de défaut monophasé auto-extincteur observé sur un réseau compensé ....	100
Figure 10-2 – Architecture du procédé d'identification des régimes de fonctionnement .....	102
Figure 10-3 –Comportement de la tension homopolaire pour deux fenêtres d'observation ( $T_{obs} = T_0$ et $T_{obs} = T_0/2$ ) en présence d'un défaut réamorçant .....	104
Figure 10-4 – Comportement de l'indicateur en présence des transitoires d'apparition (a) et de disparition (b) d'un défaut monophasé permanent sur un réseau compensé.....	106
Figure 10-5 – Comportement de l'indicateur « pente » en présence d'un défaut réamorçant.....	108
Figure 10-6 – Décomposition des régimes d'apparition et de disparition de défauts monophasés affectant les réseaux à neutre compensé après correction des retards .....	110
Figure 10-7 – Principe de la compensation du retard de détection pour les transitoires d'apparition « isolés » .....	113
Figure 11-1 – Lien entre l'échantillonnage de l'axe temporel et la précision de la segmentation .....	115
Figure 12-1 – Représentation de deux classes de défauts (défauts monophasés et biphasés isolés aval) dans un espace constitué de 3 indicateurs.....	124
Figure 12-2 – Types d'informations recherchées selon le régime de fonctionnement.....	126
Figure 13-1 – Influence du référencement pour les variations des courants .....	131
Figure 14-1 – Variabilité de la durée du segment transitoire pour deux enclenchements de départ situés en aval du point de mesure .....	134
Figure 14-2 – Variations des composantes directes des tensions et des courants calculées sur le segment transitoire fourni par l'intervalle étendu (a&b) et par l'algorithme de segmentation adaptatif (c&d).....	135
Figure 14-3 – Illustration du comportement de la valeur moyenne en présence de défauts et de l'enclenchement d'un départ.....	137
Figure 14-4 – Comportement de la valeur moyenne en présence de défauts monophasés .....	138
Figure 14-5 – Evolution de l'écart des valeurs efficaces des tensions simples et des courants de ligne lors d'un enclenchement de départ.....	139
Figure 14-6 – Evolution de l'écart des valeurs efficaces d'un courant de ligne pendant le transitoire d'apparition d'un défaut biphasé .....	140
Figure 14-7 – Analyse de la forme d'onde d'une tension simple par filtrage anti-harmoniques .....	142
Figure 14-8 – Comportement des indicateurs en présence d'un enclenchement de batterie de condensateurs (a) et d'un défaut (b).....	143

---



## Liste des figures

---

Figure 14-9 – Extraction de l'information de direction des formes d'onde d'un enclenchement de batteries de condensateurs de compensation.....	144
Figure 14-10 – Ajustement de courbe par un modèle exponentiel du 1 <sup>er</sup> ordre sur les composantes directes des tensions (a) et des courants (b).....	146
Figure 14-11 – Ajustement des signaux déterminés par filtrage anti-harmoniques des formes d'onde d'une tension simple (a) et d'un courant de ligne (b).....	148
Figure 14-12 – Ajustement des formes d'onde de la tension homopolaire (a) et du courant résiduel (b) sur le transitoire de disparition.....	149
Figure 14-13 – Spectre du signal après filtrage anti-harmoniques du transitoire d'une tension (Evènement : enclenchement d'une batterie de condensateurs).....	151
Figure 14-14 – Spectre de la tension homopolaire pendant le transitoire d'apparition d'un défaut monophasé.....	152
Figure 14-15 – Illustration du processus d'estimation.....	153
Figure 15-1 – Intervalles analysés pour le calcul des références de régimes permanents.....	157
Figure 15-2 – Comportement de la valeur de l'indicateur de direction en fonction du retard de segmentation et de la fréquence principale du transitoire pour l'enclenchement d'une batterie en aval.....	159
Figure 15-3 – Comportement des indicateurs d'ajustement d'une forme d'onde de tension lors de l'enclenchement d'une batterie de condensateurs localisée en aval du point de mesure.....	160
Figure 15-4 – Comportement d'un indicateur analysant l'appel de courant à l'enclenchement d'un départ en aval du point de mesure en fonction de l'erreur de segmentation et de la profondeur du creux.....	161
Figure 17-1 – Structure générique du module d'identification des perturbations.....	167
Figure 17-2 – Structure des modules de caractérisation et d'identification des régimes de fonctionnement transitoires.....	171
Figure 17-3 – Organisation des modules de caractérisation et de reconnaissance des régimes permanents et transitoires.....	174
Figure 17-4 – Exemples de fonctions de vraisemblance utilisées par le système expert.....	175
Figure 17-5 – Principe de la structure de décision à éliminations successives.....	176
Figure 17-6 – Séparation de trois classes dans un espace bidimensionnel par SVM.....	178
Figure 17-7 – Intégration de l'étape de standardisation dans les phases d'apprentissage et de classification des perturbations.....	180
Figure 18-1 – Points de mesure considérés sur un réseau-type.....	182
Figure 18-2 – Exemple de répartition des puissances des transformateurs de livraison HTA-BT pour un réseau rural et un réseau urbain.....	182
Figure 18-3 – Répartition des résistances des défauts monophasés permanents [EDF94a].....	184
Figure 18-4 – Démarche de simulation paramétrique suivie par l'outil d'interfaçage entre le logiciel EMTP-RV® et le traitement automatique des formes d'onde.....	185

---

## Liste des figures

---

Figure 18-5 – Comportement d'un indicateur lié à l'intensité de l'appel de courant à l'enclenchement pour des instants d'enclenchement et des valeurs de flux rémanent différents .....	188
Figure 18-6 – Schéma de commande hybride des simulations paramétriques .....	189
Figure 19-1 – Architecture du système de reconnaissance des régimes permanents .....	193
Figure 19-2 – Répartition des valeurs de la tension homopolaire en présence de défauts monophasés en aval du jeu de barres pour différentes configurations d'un réseau impédant .....	195
Figure 19-3 – Répartition des valeurs des tensions directes et homopolaire en présence de différentes classes de défauts pour différentes configurations d'un réseau impédant .....	197
Figure 19-4 – Architecture du 1 <sup>er</sup> niveau de reconnaissance des régimes transitoires .....	199
Figure 19-5 – Schéma explicatif d'une 3-fold cross-validation .....	204
Figure 19-6 – Schéma d'évaluation des performances des classifieurs SVM par validation-croisée .....	205
Figure 19-7 – Exemple de carte de performance d'un classifieur SVM .....	205
Figure 20-1 – Exemple de défaut évolutif (perturbation de la Figure 13-1).....	211
Figure 20-2 – Exemple de perturbations « atypiques ».....	214
Figure B-1 – Localisation des points de mesure sur les réseaux-types .....	231
Figure B-2 – Représentation générique d'un réseau rural à neutre compensé sous EMTP-RV® dans le cadre de la simulation des perturbations d'enclenchement du départ 11 .....	233
Figure B-3 – Représentation générique d'un départ rural sous EMTP-RV® .....	234
Figure C-1 – Variogrammes des indicateurs portant sur les variations des courants de lignes (a) et des puissances actives (b) observées à l'enclenchement d'un départ .....	236
Figure C-2 – Approximation par krigeage ordinaire du comportement de l'indicateur.....	238
Figure C-3 – Comparaison des interpolations par krigeage ordinaire et universel du comportement de l'indicateur .....	239
Figure C-4 – Comportement du critère EI pour l'indicateur de la Figure C-2-a.....	241
Figure D-1 – Discrimination de données linéairement séparables.....	242
Figure D-2 – Discrimination de données non linéairement séparables par un hyperplan optimal généralisé.....	243
Figure D-3 – Discrimination de données non linéairement séparables par transformation de l'espace de description .....	244

## Liste des tableaux

Tableau 1 – Coût calculatoire relatif de l'étape de pré-traitement pour différentes variantes.....	81
Tableau 2 – Performances des variantes du procédé de segmentation adaptatif.....	116
Tableau 3 – Performances du procédé de segmentation événementielle .....	120
Tableau 4 – Présentation des 69 classes considérées par le système de reconnaissance.....	169
Tableau 5 – Plages de variations des principaux paramètres des réseaux ruraux et urbains simulés lors de l'étude paramétrique .....	183
Tableau 6 – Performances des systèmes de reconnaissance experts définis pour les régimes permanents et transitoires pour les deux régimes de neutre .....	201
Tableau 7 – Performances des systèmes de reconnaissance SVM définis pour les régimes permanents et transitoires (régime de neutre : compensé ; point de mesure : jeu de barres du poste source).....	208
Tableau 8 – Nombre d'événements de chaque classe utilisés pour évaluer les systèmes de reconnaissance .....	211
Tableau 9 – Performances des systèmes experts sur la base des enregistrements réels.....	212
Tableau 10 – Performances des classifieurs SVM sur la base des enregistrements réels .....	215